



TREBALL DE FI DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA DE SISTEMES DE TELECOMUNICACIÓ

RADAR PER AUTOMÒBIL D'ONA CONTÍNUA MODULAT EN FREQUÈNCIA A 77 GHz

Pere Montané Mas

DIRECTOR: Jordi Verdu Tirado

DEPARTAMENT DE TELECOMUNICACIÓ I ENGINYERIA DE SISTEMES

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Bellaterra, Juliol 2, 2019



El tribunal d'avaluació d'aquest Treball Fi de Grau, reunit el dia _____, ha acordat concedir la següent qualificació:

President: _____

Vocal: _____

Secretari: _____



El sotasignant, Jordi Verdu Tirado, Professor de l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

CERTIFICA:

Que el projecte presentat en aquesta memòria de Treball Fi de Grau ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne Pere Montané Mas.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 2 de Juliol de 2019.

Signatura:

Resum:

El radar va sorgir de diferents experiments en els que es jugava amb les reflexions de les ones electromagnètiques. Al començament, l'ús era principalment militar. Avui en dia, els sistemes radar es fan servir en molts àmbits diferenciats; un dels que en depenen més és l'automoció. Els primers radars d'aquesta indústria van començar a aparèixer dècades enllà. Amb aquests sistemes es busca augmentar la seguretat de l'usuari, a la vegada que millorar el confort. Els radars en l'automoció treballen a dues freqüències principals: 24 GHz i 77 GHz. A causa de noves normatives, els sistemes a 24 GHz quedaran obsolets, i donaran pas a utilitzar sistemes a 77 GHz.

En aquest projecte es tractaran tant aspectes teòrics com pràctics del radar d'ona contínua modulada en freqüència a 77 GHz. L'objectiu principal del projecte és la posada en marxa del sistema; fent incís en aconseguir extreure les dades. S'explicaran els diferents modes d'operació del radar i les mesures possibles utilitzant la plataforma mmWave Demo Visualizer proporcionada per Texas Instruments, així com les diferents maneres de manipular les dades obtingudes del sistema. Es presentaran diferents mesures realitzades tant dins com fora de la cambra anecoica electromagnètica on es podrà observar el mètode d'obtenció del rang, la velocitat i la posició dels diferents blancs.

Resumen:

El radar surgió de diferentes experimentos en los que se jugaba con las reflexiones de ondas electromagnéticas. Al principio, el uso era militar. Hoy, los sistemas radar se utilizan en muchos ámbitos diferentes, uno de los más importantes el de la automoción. Los primeros radares de esta industria empezaron a aparecer hace décadas. Con estos sistemas se busca aumentar la seguridad del usuario, a la vez que mejoran el confort. Los radares en automoción trabajan a dos frecuencias principales: 24 GHz y 77 GHz. Por nuevas normativas, los sistemas a 24 GHz quedarán obsoletos y darán paso a utilizar sistemas a 77 GHz.

En este proyecto se tratarán tanto aspectos teóricos como prácticos del radar de onda continua modulado en frecuencia a 77 GHz. El objetivo principal es poner en marcha el sistema, sobre todo, en extraer los datos. Se explicarán los diferentes modos de operación del sistema y las posibles medidas utilizando la plataforma mmWave Demo Visualizer proporcionada por Texas Instruments, así como las distintas formas de manipular los datos obtenidas del sistema. Se presentarán diferentes medidas realizadas tanto dentro como fuera de la cámara anecoica electromagnética donde se podrá observar el método de obtención de rango, velocidad y posición de los distintos blancos.

Summary:

Radar systems arose from different experiments in which was observed the wave reflection phenomenon. At the beginning, radar use was strictly military. Nowadays, radar systems are present in many fields. Automotive field highly depends on these systems. The first radars on this industry began to appear decades ago. The objective of these systems is to improve user's safety, as well as get better comfort. Automotive radars work principally at two main frequencies: 24 GHz and 77 GHz. Due to new rules, 24 GHz Systems will remain out-date, and will give way to use 77 GHz systems. In this project theoretical aspects as well as practical aspects of 77 GHz FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar will be treated. The main objective of the project is the start-up of the system, focusing on data extraction. The radar operation modes and possible measurements, obtained using the platform given by Texas Instruments, mmWave Demo Visualizer, will be explained, such as the possibilities to manipulate the data obtained from the system. Also, different measurements produced inside and outside of electromagnetic anechoic chamber where the range, speed and angular position obtention method from different targets, will be observed.

Abstract

Radar (RAdio Detection And Ranging) systems arose from different experiments in which was observed the wave reflection phenomenon. At the beginning, radar use was strictly military. Nowadays, radar systems are present in many fields. Automotive field highly depends on these systems. The first radars on this industry began to appear decades ago. The objective of these systems is to improve user's safety, as well as get better comfort. Automotive radars work principally at two main frequencies: 24 GHz and 77 GHz. Due to new rules, 24 GHz systems will remain out-date, and will give way to use 77 GHz systems.

In this project theoretical aspects as well as practical aspects of 77 GHz FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar will be treated. The main objective of the project is the start-up of the system, focusing on data extraction. The radar operation modes and possible measurements, obtained using the platform given by *Texas Instruments, mmWave Demo Visualizer*, will be explained, such as the possibilities to manipulate the data obtained from the system. Also, different measurements produced inside and outside of electromagnetic anechoic chamber where the range, speed and angular position obtention method from different targets, will be observed.

Resum

El radar (*RAdio Detection and Ranging*) va sorgir de diferents experiments en els que es jugava amb les reflexions de les ones electromagnètiques. Al començament, l'ús era principalment militar. Avui en dia, els sistemes radar es fan servir en molts àmbits diferenciats; un dels que en depenen més és l'automoció. Els primers radars d'aquesta indústria van començar a aparèixer dècades enllà. Amb aquests sistemes es busca augmentar la seguretat de l'usuari, a la vegada que millorar el confort. Els radars en l'automoció treballen a dues freqüències principals: 24 GHz i 77 GHz. A causa de noves normatives, els sistemes a 24 GHz quedaran obsolets, i donaran pas a utilitzar sistemes a 77 GHz.

En aquest projecte es tractaran tant aspectes teòrics com pràctics del radar d'ona contínua modulada en freqüència a 77 GHz. L'objectiu principal del projecte és la posada en marxa del sistema; fent incís en aconseguir extreure les dades. S'explicaran els diferents modes d'operació del radar i les mesures possibles utilitzant la plataforma *mmWave Demo Visualizer* proporcionada per *Texas Instruments*, així com les diferents maneres de manipular les dades obtingudes del sistema. Es presentaran diferents mesures realitzades tant dins com fora de la cambra anecoica electromagnètica on es podrà observar el mètode d'obtenció del rang, la velocitat i la posició dels diferents blancs.

Agraïments

M'agradaria donar les gràcies a Jordi Verdú per permetre'm aprendre de manera més pràctica tot el funcionament del sistema radar a partir de la placa IWR1642Boost disponible. També, m'agradaria donar les gràcies a Ernesto Díaz pel muntatge del suport de la placa, i, sobretot, a Eloi Guerrero per aguantar les innombrables preguntes que m'han anat sorgint.

Continguts

Abstract	i
Resumen	iii
Agraïments	v
Llista de Figures	xi
Llista de Taules	xiii
1 Introducció	1
1.1 Aplicacions	2
1.2 Radar en l'automoció	3
2 Teoria del radar	7
2.1 Tipus de radars	8
2.2 Principis del radar FM-CW	10
2.2.1 Scattering	11
2.2.2 Equació del rang	13
2.2.3 Equació de la velocitat	15
2.2.4 Equació de la posició angular	18
2.2.5 Altres	19
3 Radar a 77 GHz: IWR1642Boost	21

3.1	IWR1642Boost	21
3.1.1	Hardware	21
3.1.2	Antenes	25
3.1.3	Connectivitat potència i placa-PC	28
3.2	Posada en marxa	29
3.2.1	Programari	29
3.2.2	Primer contacte	29
3.2.3	<i>mmWave Demo Visualizer</i>	30
3.2.4	<i>Code Composer Studio (CCS)</i>	33
3.2.5	<i>UniFlash</i>	33
3.2.6	Extracció de dades del radar	33
3.2.7	Altres: CLI <i>Console Message</i>	34
3.3	Descodificació arxiu <i>.dat</i>	39
3.4	Estructura de dades: <i>packageall</i>	41
4	Experimentació	45
4.1	Programes per a mesures	45
4.2	Experimentació: laboratori	46
4.2.1	Mapeig en 2-D (X,Y)	50
4.2.2	Perfil de rang i resolució en distància	51
4.2.3	Velocitat i resolució en velocitat	52
4.3	Reflector tetraedre	53
4.4	Experimentació: cambra anecoica	58
4.4.1	Angle d'arribada (AoA)	67
4.4.2	Mesures: material d'absorció	68
5	Conclusions	73

Bibliografia

Llista de Figures

1.1	Cadena de radars a UK	2
1.2	Bandes freqüencials en l'automoció	5
2.1	Diagrama de blocs radar	7
2.2	Tipus d'ona en radar	8
2.3	Radar d'ona contínua	9
2.4	Radar polsat d'ona contínua	9
2.5	FM-CW radar amb modulació "dents de serra"	10
2.6	Diagrama de blocs radar FM-CW	11
2.7	Fenomen <i>Scattering</i> a la zona Rayleigh	11
2.8	RCS (<i>backscattered</i>) per esfera conductora perfecte	12
2.9	Forma d'ona radar FM-CW (<i>Chirps</i>).	13
2.10	<i>Chirp</i> mapejada sobre eixos freqüencial i temporal.	14
2.11	Diferència <i>chirps</i> Tx i Rx	14
2.12	<i>Fast ramp FMCW radar: Doppler FFT</i>	17
2.13	Espectre de la FFT Doppler	18
2.14	Espectre dos pics de FFT Doppler	18
2.15	Arribada de l'ona a diferents antenes	19
3.1	Vista cara davantera placa IWR1642Boost	22
3.2	Vista cara posterior placa IWR1642Boost	22

3.3	Diagrama de blocs: IWR1642Boost	23
3.4	Unitat de processament: IWR1642Boost	24
3.5	Antenes de Rx i Tx	25
3.6	Patró antenes transmissores	26
3.7	Patró en azimuth de l'antena Tx1	26
3.8	Patró en azimuth de l'antena Tx2	27
3.9	Patró en elevació de l'antena Tx1	27
3.10	Patró en elevació de l'antena Tx1	28
3.11	Administrador de dispositius, ports	30
3.12	<i>Serial Port Configuration Demo Visualizer</i>	31
3.13	Missatge connexió ports	31
3.14	<i>Configuration tab Demo Visualizer</i>	32
3.15	<i>Plot tab Demo Visualizer</i>	32
3.16	Eina de captura de dades	35
3.17	Exemple de CLI activació radar	38
4.1	Mapeig 2-D blanc BRR	47
4.2	Mapeig 2-D blanc BVR	47
4.3	Perfil de rang mesura BRR vs BVR	48
4.4	Reflector Tetraedre	53
4.5	Escenari càlcul RCS	54
4.6	RCS experimental en escenari (4.6)	54
4.7	Mapeig en 2-D escenari reflector tetraedre	56
4.8	Perfil de rang escenari reflector tetraedre	56
4.9	Mapeig en 2-D segon escenari reflector tetraedre	57
4.10	Perfil de rang segon escenari reflector tetraedre	57
4.11	Muntatge radar en cambra anecoica	58
4.12	Muntatge reflector tetraedre en cambra anecoica	59

4.13 Escenari cambra anecoica	59
4.14 Resultats de l'experiment 1	60
4.15 Resultats de l'experiment 2	61
4.16 Resultats de l'experiment 3	62
4.17 Resultats de l'experiment 4	63
4.18 Resultats de l'experiment 5	64
4.19 Resultats de l'experiment 6	65
4.20 Resultats de l'experiment 7	67
4.21 Escenari material absorbent	68
4.22 Resultats de l'experiment 8	69
4.23 Resultats de l'experiment 9	70

Llista de Taules

1.1	Sensors en l'automoció	4
1.2	Classificació dels radars d'automoció segons mesures en rang	5
2.1	Classificació dels radars segons el tipus d'ona emès	10
2.2	Taula resum de fórmules	20
3.1	Posició relativa antenes respecte centre placa	25
3.2	Estructura <i>packageall</i> { <i>n,1</i> }	42
4.1	Paràmetres mesures	48

Capítol 1

Introducció

Els sistemes radars van sorgir a partir de la necessitat de detectar objectius per a diferents motius, com podria ser la necessitat de detectar naus agressores en aire o en mar per ús militar o la necessitat de detectar objectes quan les condicions de visibilitat són baixes [Gri18].

El nom de radar va ser encunyat per la Marina dels Estats Units com a acrònim de *Radio Ranging And Detection*. La idea del sistema va sorgir l'any 1886 quan Heinrich Rudolf Hertz va demostrar que les ones electromagnètiques eren reflectides en superfícies metàl·liques. D'aquí van sorgir diferents sistemes d'anti-col·lisió. Anys més tard, amb el desenvolupament de la radio i de la transmissió sense fils (gràcies a això es van crear les antenes), Nikola Tesla estableix els principis teòrics del futur radar, és a dir, les freqüències i els nivells de potència utilitzats [Gua10]. Seguint les teories de Tesla, l'any 1934 es realitzen els primers assaigs sobre sistemes de detecció d'ona curta; aleshores neixen els radars d'ones decamètriques. L'any 1935, ja van sorgir diferents articles en diaris com *The Detection of Aircraft by Radio Methods*.

Amb l'esclat de la Segona Guerra Mundial, el setembre de 1939, es va fer un gran pas en la millora dels sistemes radars. Anglaterra ja n'havia creat una cadena al llarg de la costa [Hol04]. Aquell mateix any, es va crear un tub d'electrons anomenat magnetró de cavitat ressonant, capaç de generar polsos de ràdio d'alta freqüència amb molta potència, permetent així, el pas al desenvolupament dels radars microones.

Un cop va acabar la Segona Guerra Mundial, les millores en els sistemes radars no van frenar. Es va començar a donar importància a utilitzar-los en àmbits civils, com per exemple, la meteorologia o la vigilància i prevenció de col·lisions per a l'aviació civil. El nivell de potència que requerien els sistemes de detecció feia que fossin poc accessibles en aquestes èpoques; si no, impossibles.

Als anys setanta, es va començar a plantejar l'ús d'aquests sistemes en la seguretat d'alguns sectors, com l'automoció i l'aviació, i es van realitzar les primeres proves del radar per a

automòbil. Des d'aquell moment, aquests sistemes han anat evolucionant amb el pas dels anys, fins a convertir-se en sistemes essencials per a la societat actual. Els sistemes de radar d'alta tecnologia estan associats al processament de senyals digitals, aprenentatge automàtic i capacitat d'extreure informació útil a partir de nivell de sorolls molt elevats.



Figura 1.1: Cadena de radars a UK

En només uns anys, la idea de tenir automòbils autodirigits ha passat de ser una idea a ser una realitat.

1.1 Aplicacions

La informació proporcionada per els sistemes radars inclou la direcció i el rang de l'objecte detectat. Per aquest motiu, s'utilitza en molts camps diferents on la necessitat d'aquest posicionament és crucial. El primer ús del radar, esmentat anteriorment, era per a propòsits militars, com localització d'objectius terrestres, aeris i marins.

En el sector de l'aviació, les naus s'equipen amb dispositius de radar que adverteixen sobre

la presència d'avions i altres obstacles trobats en la trajectòria, i, mostren també, informació meteorològica i donen lectures d'altitud. Els aeroports també estan equipats amb sistemes d'enfocament controlats per terra amb assistència de radar on l'avió s'observa en pantalla quan les condicions meteorològiques no són idònies.

En el sector marítim, els radars s'utilitzen per mesurar la distància entre el vaixell i el port, o entre el vaixell i altres vaixells. En aquest sector és molt útil, ja que si hi ha poca visibilitat, aquests tipus de sistemes són els adequats.

Els meteoròlegs utilitzen el radar per controlar la precipitació i el vent, és l'eina principal per a la previsió a curt termini i vigilància de les inclemències meteorològiques, com els tornados o les tempestes.

Els radars s'utilitzen en la vida quotidiana, per exemple, per vigilar la velocitat dels vehicles en carreteres, o per detectar moviment humà, com podrien ser patrons respiratoris per a la vigilància del son.

Tot i així, actualment, un dels sectors on el radar té més recorregut, és en el sector de l'automoció [Bha16].

1.2 Radar en l'automoció

Els radars d'automoció, com altres sistemes, com per exemple, el sistema Lidar, l'ultra so, les càmeres..., formen part de l'eix principal dels vehicles d'autoconducció i dels sistemes d'assistència de conducció (ADAS, *Advanced Driver Assistance Systems*). Aquests sistemes són responsables de la detecció d'objectes i obstacles, de la posició i de la velocitat relativa del vehicle, i són interessants a causa de que són sistemes que en condicions de poca visibilitat, ofereixen la possibilitat de detectar a llargues distàncies, i això, pot ajudar a evitar col·lisions. Un sensor ideal, ha de combinar el bon comportament en la resolució de rang, en resolució de velocitat i en resolució angular, així com funcionar sota totes les condicions.

El desenvolupament dels radars en l'automoció ha tingut un començament lent [Dic13], però en els darrers anys, se n'ha augmentat l'interès i la investigació. Ja fa uns anys, els transports amb vehicles de carretera també ha anat augmentant significativament, i alhora, els accidents també ho han fet. Això ha donat pas a pensar en solucions que facin d'aquest transport un transport més segur. D'aquí en sorgeix la idea de utilitzar sistemes de radio detecció. Els sistemes de creuer adaptable (ACC) han sigut el punt d'interès en la recerca i el desenvolupament des de fa dècades.

La història del desenvolupament dels radars en l'automoció va començar al voltant dels anys setanta, on es van provar sensors de 35 GHz, que eren dispositius amb antenes suficientment

petites per cable en la part frontal dels vehicles. Antigament, s'havien fet proves amb sistemes de mesures força grans. No va ser fins l'any 1998 quan Mercedes va fer operacional el primer sistema a 77 GHz. Tot seguit, es van combinar els sensors de radar de llarg abast (LRR) a 77 GHz i els radars de curt abast (SRR) a 24 GHz creant un sistema apte per al trànsit urbà [Gre11]. Actualment, els sistemes radars a 77 GHz continuen funcionant com a LRR, i els sistemes radars a 24 GHz es fan servir per a sistemes de detecció de punt cec (BSD) o com a assistent de canvi de carril (LCW).

Sensor	Avantatges	Inconvenients
IR	Bo per a distància curta. Ample camp de visió (FOV). Cost baix.	Afectat per pluja i pols. No és bo per velocitat.
US	Limitat a distància curta. Cost baix.	No és bo per resolució angular. Afectat pel vent i pel soroll.
Làser	Altament direccional. Excel·lent pel rang.	Limitat FOV. Afectat per la pluja i la boira.
Càmera	Bon FOV. Distància acceptable fins a 100m. Classificació d'objectes.	No és bo per mesures de velocitat. No opera en condicions de nit.
Radar	Excel·lent per rang fins a 250m. Solució ideal per velocitat. Bona resolució angular. Robust en cada condició meteorològica. Bon cost.	Sense classificació d'objecte.
Lidar	Millor resolució de rang, velocitat i angular. Camp de visió molt ample.	Cost alt.

Taula 1.1: Sensors en l'automoció

Les dues principals freqüències utilitzades en les aplicacions radars, en aquest àmbit, són les de 24 GHz i les de 77 GHz. La indústria s'està desplaçant cap a les tecnologies a més alta freqüència a causa de beneficis claus respecte a les freqüències inferiors. La banda de 24 GHz, que no requereix llicència, inclou una banda industrial, científica i mèdica (ISM) que va des dels 24 als 24.25 GHz, anomenada textitnarrowband (NB) amb un ample de banda disponible de 250 MHz. També inclou una banda anomenada textitultrawideband (UWB) de 5 GHz. A causa de noves normes i estàndards desenvolupats per l'Institut d'estàndards de Telecomunicacions Europees (ETSI) i de la Comissió Federal de Comunicacions (FCC), la UWB quedarà obsoleta, això comporta que l'ús de la banda de 24 GHz quedarà en desús degut al poc ample de banda disponible, els 250 MHz de la banda ISM. Això comportarà que els dispositius a 24 GHz comencin a moure's cap a la banda de 77 GHz. Aquesta banda comporta beneficis com un ample de banda disponible molt més ample, de 5 GHz en total, amb 1 GHz per a la banda d'automoció LRR i

4 GHz per a la banda d'automoció SRR, que millora tant la resolució en rang com la precisió. Alhora, també es millora la resolució de velocitat, ja que és inversament proporcional a la freqüència.

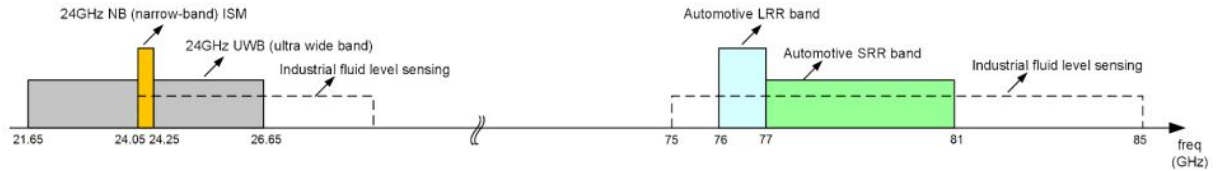


Figura 1.2: Bandes freqüencials en l'automoció

Tipus de radar	Radar de llarg abast (LRR)	Radar de mig abast (MRR)	Radar de curt abast (SRR)
Rang (m)	10-250	1-100	0.15-30
Camp de visió en azimuth (graus)	$\pm 15^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 80^\circ$
Camp de visió en elevació (graus)	$\pm 5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
Aplicacions	Control de creuer automàtic (ACC).	Assistència de canvi de carril, alerta de trànsit creuat, detecció de punt cec, avís de col·lisió de darrera.	Assistent d'aparcament, detecció d'obstacles, avís de col·lisió.

Taula 1.2: Classificació dels radars d'automoció segons mesures en rang

En l'àmbit de l'automoció [Ali17], s'ha buscat des de l'inici un objectiu de zero accidents fatals, per això els Sistemes Avançats d'Assistència de Conducció (ADAS) han anat evolucionant. Per aquest motiu, en les aplicacions radars primàries, es poden agrupar els radars de la següent forma:

- Radars de cantonada (*Corner Radars*): Col·locats tant a les cantonades de davant com de darrera. Són típicament radars de curt abast (SRR) que tenen funcions com la detecció de punt cec, l'assistència en canvi de carril i l'alerta de trànsit transversal.
- Radars frontals (*Front Radars*): Típicament són radars de mig i llarg abast (LRR) responsables de frenat d'emergències autònomes i de control de creuers adaptatiu.

Capítol 2

Teoria del radar

Tot sovint, quan pensem en com va sorgir la idea de fer un radar ens imaginem el següent escenari: volem saber a quin nivell es troba l'aigua d'un pou, i per saber-ho agafem una pedra i la llancem; així, relacionarem el temps que ha passat, des de que hem deixat anar la pedra fins que hem sentit el soroll al arribar a l'aigua, amb la profunditat del pou. Bé doncs, la teoria del radar és semblant, ja que la distància a la que es troba un objecte es calcularà segons el retard que hi ha des de que envies l'ona fins que la reps. Els apunts proporcionats per l'assignatura d'Aplicacions Multidisciplinàries de les Telecomunicacions II, [Pac18], són de gran ajuda per a la comprensió d'aquests sistemes.

Els sistemes radar (acrònim de *Radio Ranging And Detection*), són sistemes de detecció que fan servir les ones ràdio per determinar la distància a la que es troba un objecte, la velocitat a la que va, la direcció en la que es troba, l'altitud i la mida [Pon14], [The11] i [The17]. Aquests objectes il·luminats pel radar, seran anomenats blancs. El radar està format per els següents elements:

- Antena transmissora: Emissió de radiació o d'ones generades per una font.
- Antena receptora i receptor o detector.

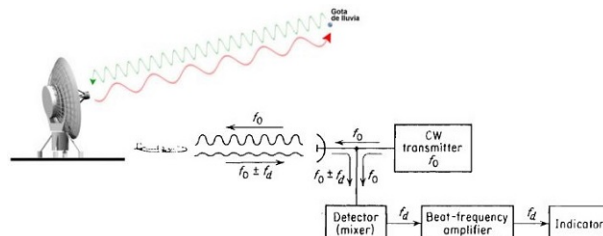


Figura 2.1: Diagrama de blocs radar

2.1 Tipus de radars

Hi ha diferents maneres d'identificar tipus de radars:

- Segons la posició del transmissor i el receptor:
 - Monoestàtic: El transmissor i el receptor es troben en el mateix sistema.
 - Biestàtic: El transmissor i el receptor es troben en diferents sistemes.
- Segons el número d'antenes:
 - Mono-antena.
 - Multi-antena (*Phased Arrays/MIMO Multiple Input Multiple Output.*)
- Segons la interacció amb el blanc:
 - Primari: S'il·lumina el blanc amb un senyal electromagnètic i no hi ha cap mena d'interacció.
 - Secundari: S'il·lumina el blanc amb un "senyal d'interrogació", el blanc "contesta" amb un senyal a una freqüència diferent, això, permetrà: evitar la presència d'ecos per objectes propers, la resposta del blanc permet la identificació, i, el senyal enviat per el blanc, recorrerà la meitat de distància que en el cas primari.
- Segons el tipus d'ona transmesa:
 - Ona contínua (CW).
 - Polsats d'ona continua.
 - Modulats en freqüència (FM-CW).

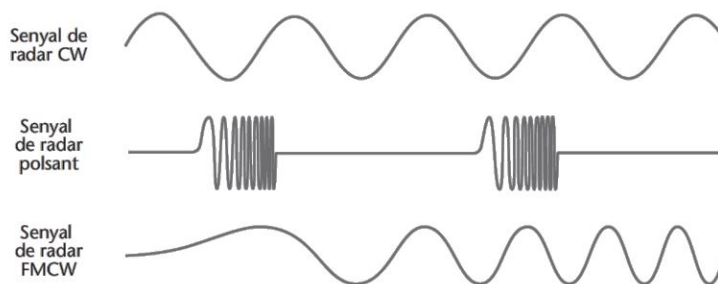


Figura 2.2: Tipus d'ona en radar

L'última diferenciació és una de les més importants, a causa de que depèn del tipus d'ona que s'emeti es podran obtenir unes mesures o unes altres. Així doncs, els radars es diferencien en tres grans grups segons els tipus d'ona:

- Radar d'ona contínua (*CW Radar*): Aquest tipus de radar envia un senyal en forma d'ona contínua: $s(t) = e^{j2\pi f_c t}$, que serà rebut un cop hagi estat reflectit pels diferents blancs. Aquest senyal estarà desplaçat en freqüència. Aquest tipus de radar fa servir el principi Doppler. El funcionament es pot observar en la figura (2.3):

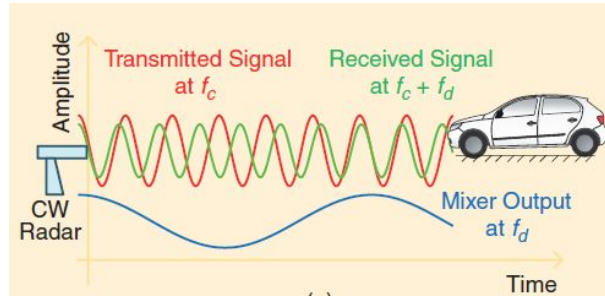


Figura 2.3: Radar d'ona contínua

L'avantatge principal d'aquest tipus de radar és que són més fàcils d'operar i de fabricar que un radar polsat, ja que l'energia s'allibera de manera continuada. L'inconvenient és que aquests sistemes no inclouen mesures de retard d'anada i tornada, a causa de la naturalesa de l'ona, fet que exclou la possibilitat d'estimar la posició o la distància del blanc, per tant, només mesura la velocitat.

- Radar polsat d'ona contínua (*Pulsed CW Radar*): Aquest tipus de radar consisteix en fer la convolució del senyal d'ona contínua amb un pols rectangular cada cert temps T_{PRF} de manera que el senyal transmès és $s(t) = \Pi e^{j2\pi f_c t}$. El funcionament es pot veure en la figura (2.4):

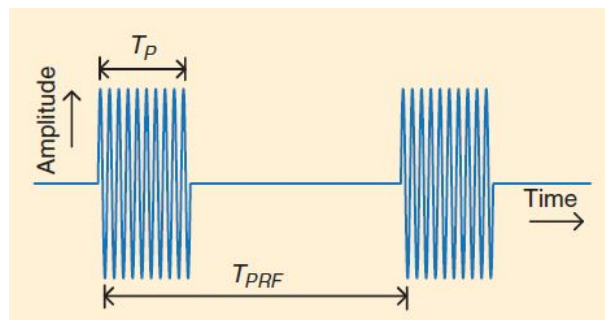


Figura 2.4: Radar polsat d'ona contínua

L'avantatge principal d'aquest radar és que al afegir la forma polsada, a part de poder mesurar la velocitat del blanc fent ús del principi Doppler, es pot mesurar el retard amb

la diferència entre els polsos rebuts i transmesos. Això, vol dir que aquest tipus de radar permet estimar el rang del blanc, així com, la seva velocitat.

- Radar d'ona contínua modulada en freqüència (*FM-CW Radar*): El radar d'ona contínua modulada en freqüència té la capacitat de mesurar velocitat, distància i posició angular del blanc. En aquest sistema es transmet un senyal d'ona contínua on la freqüència varia cap a amunt i cap avall durant un període de temps fixat per un senyal de modulació. La modulació més usada en aquest radar és la modulació "dents de serra", on cada rampa del senyal és anomenat *chirp*.

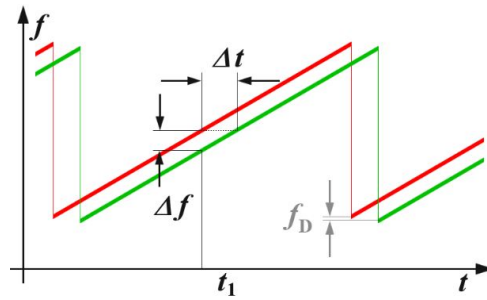


Figura 2.5: FM-CW radar amb modulació "dents de serra"

Tipus d'ona	$s(t)$	Principi de detecció	Resolució
CW	$e^{j2\pi f_c t}$	Barreja de freqüències	$\Delta f_d = 1/T$
Pulsed CW	$\Pi(T_P)e^{j2\pi f_c t}$	Correlació	$\Delta R = cT_P/2$, $\Delta f_d = 1/T_P$
FM-CW	$e^{j2\pi(f_c + 0.5Kt)t}$, $K = B/T_o$	Barreja de freqüències	$\Delta R = c/2B$, $\Delta f_d = 1/PT_o$

Taula 2.1: Classificació dels radars segons el tipus d'ona emès

B : Ample de banda del radar, T : Temps de captura de dades, T_P : Duració del pols.

2.2 Principis del radar FM-CW

El radar d'ona contínua modulada en freqüència és el sistema més utilitzat [Aut18] i el que es fa servir per a realitzar aquest treball. Com ja s'ha vist abans, aquest radar et permet fer una estimació de diferents coses: rang o distància del blanc, velocitat i posició angular. En aquesta secció s'observarà com es pot extreure la informació anterior. Abans, però, s'ha de tenir en compte que el funcionament del radar recau en la transmissió i la recepció d'ones electromagnètiques, les quals es desvien de la seva trajectòria degut a un fenomen en concret: el *Scattering*.

L'escenari més simple del radar FM-CW consisteix en que un oscil·lador o un sintetitzador generi un senyal continu que moduli en freqüència, per tant, que generi un tren de senyals *chirp*. El *chirp* s'emet per l'antena o antenes transmissores, quan retorna reflectida per un objecte, és rebuda per l'antena o antenes receptores, i el senyal rebut es converteix en freqüència utilitzant un mesclador amb el senyal transmès. El senyal resultant a freqüència IF (*Intermediate Frequency*), conté la informació del blanc. Es pot observar en l'escenari (2.6).

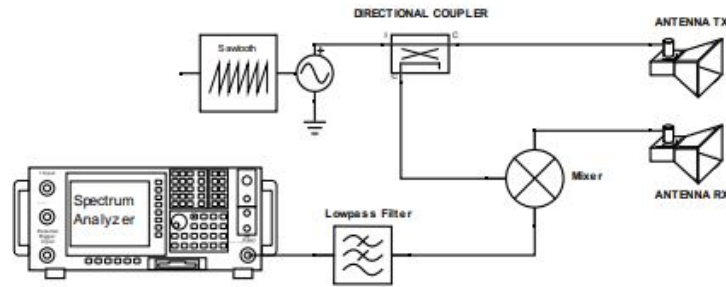


Figura 2.6: Diagrama de blocs radar FM-CW

2.2.1 Scattering

El *Scattering* és un procés físic on les formes de radiació, com podrien ser les ones electromagnètiques o la llum, es desvien de la trajectòria recta en un o més camins a causa de diferents uniformitats del medi per al que es transmet. Per tant, quan les ones electromagnètiques incideixen sobre un blanc pateixen el fenomen de la difracció o del *scattering*, i es divideixen en dues parts. La primera porció de les ones tenen una polarització igual que la de l'antena, l'altra porció, en canvi, tenen una polarització diferent. Les dues polaritzacions són ortogonals entre elles. La intensitat del fenomen de la retro-dispersió (*backscattering*), és causat per la reflexió de les ones en direcció d'on provenen amb la mateixa polarització que l'antena es fan servir per definir la secció creuada de radar del blanc (RCS, *Radar Cross Section*) [Gon18].

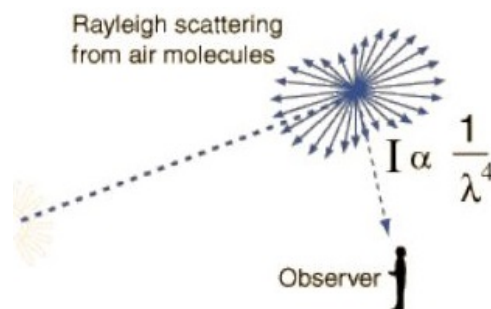


Figura 2.7: Fenomen *Scattering* a la zona Rayleigh

En la figura anterior (2.7), es pot observar el fenomen de la dispersió o *Scattering* a la zona

Rayleigh, que és la zona relacionada amb els objectes que són petits en termes de longitud d'ona. L'evolució de la RCS serà, doncs, proporcional a:

$$I \propto 1/\lambda^4 \quad (2.1)$$

Aquest terme s'usa per a descriure la potència dispersada (*scattered power*) per un blanc quan és il·luminat pel senyal RF emès pel radar, com ja s'ha esmentat [Kia05]. També es podria definir el RCS d'un blanc com l'àrea equivalent vista pel radar; és l'àrea fictícia interceptant la potència emesa, que produeix un eco en direcció al radar des del blanc. S'expressa en unitats de superfície (m^2). Matemàticament s'expressa com (2.2):

$$RCS = \sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\varphi_{radar}}{\varphi_i} \quad (2.2)$$

φ_{radar} : Densitat de potència dispersada pel blanc en el radar, φ_i : Densitat de potència incident en el blanc.

Sent les densitats de potències (2.3):

$$\varphi_i = \frac{|\vec{E}_i|^2}{\eta}; \varphi_{radar} = \frac{|\vec{E}_{radar}|^2}{\eta}; \eta = \sqrt{\mu/\epsilon} = 120\pi \quad (2.3)$$

A causa de que els blancs poden tenir RCS molt dispars, s'acostuma a treballar en unitats logarítmiques, així doncs, les unitats amb les que es sol treballar són σ són (dB/m^2) o [$dBsm$].

La RCS es pot resoldre amb les equacions de Maxwell [RCS14]. Es pot obtenir la RCS d'una esfera conductora perfecte segons el radi, distribuïda en les diferents regions (*Rayleigh*, *Mie*, *Optical*), com es pot observar en la següent figura (2.8):

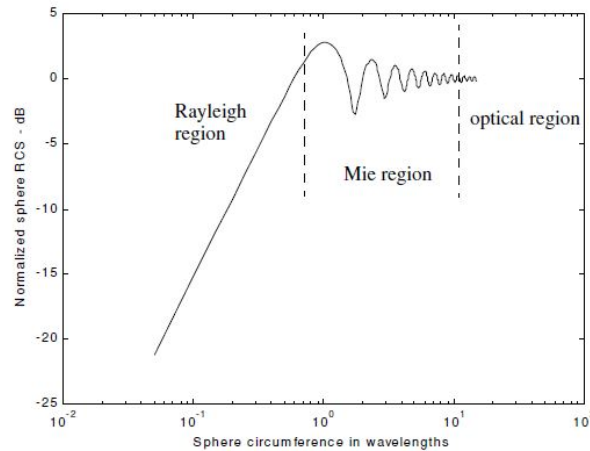


Figura 2.8: RCS (*backscattered*) per esfera conductora perfecte

2.2.2 Equació del rang

Com s'ha vist al començament d'aquest treball, la mesura més simple que pot realitzar un sistema radar és l'estimació del rang o la distància d'un blanc. Si s'estigués parlant d'un radar polsat, la distància del blanc es podria relacionar directament amb el retard temporal des de que es transmet el senyal fins que es rep, i la velocitat de la llum, com es pot observar en l'equació (2.4).

$$R = \frac{c_o t}{2} \quad (2.4)$$

En el cas del radar d'ona contínua modulada en freqüència s'han de tenir clars alguns conceptes per a extreure les estimacions desitjades. Aquest tipus de sistema transmet un senyal d'ona contínua que va variant la seva freqüència amb el temps, segons l'equació (2.5). Cada sinusoidal en que la freqüència augmenta linealment amb el temps segons (2.6) és anomenat *chirp*. Cada *chirp* es caracteritza per tenir els següents elements, com s'observa en la figura (2.10): la freqüència inicial o de referència (f_c); l'amplada de banda (B), que fa referència a l'escombrat que fa la sinusoidal en freqüència; i el temps de *chirp* (T_{chirp}), que és la duració de la "rampa".

$$s(t) = e^{j2\pi(f_c + 0.5Kt)t}, K = B/T_o \quad (2.5)$$

$$f(t) = f_c + (B/T_{chirp})t \quad (2.6)$$

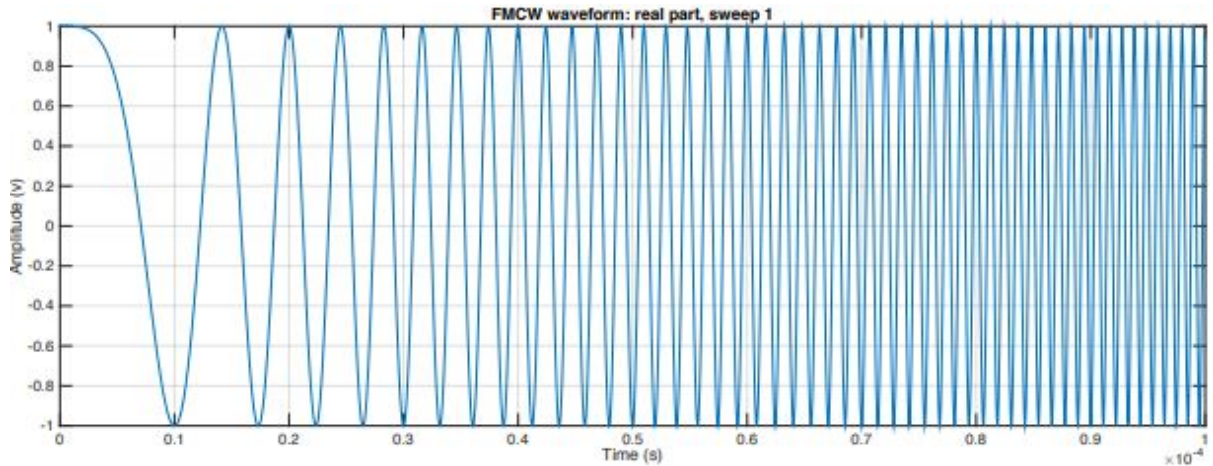


Figura 2.9: Forma d'ona radar FM-CW (*Chirps*).

Per a poder apreciar com és realment un senyal *chirp*, és convenient representar-lo sobre els eixos temporal i freqüencial com s'observa en la figura (2.11). Hi ha un paràmetre de suma importància en els senyals *chirp*, l'anomenat *chirp slope*, que defineix amb quina velocitat el *chirp* arriba al valor més alt en freqüència, i aquest ve donat segons l'expressió (2.7).

$$S_{chirp}(Slope) = B/T_{chirp} \quad (2.7)$$

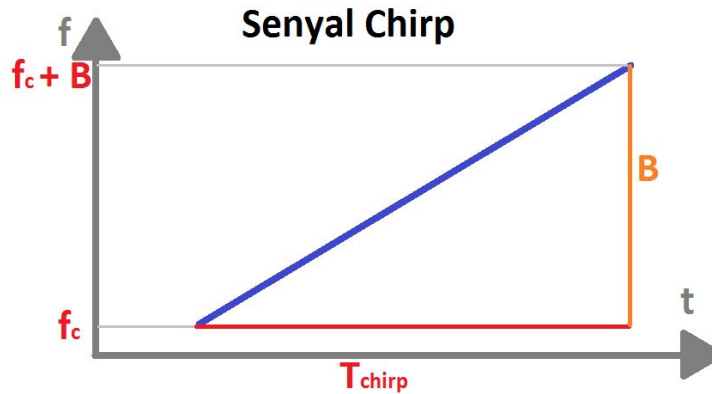


Figura 2.10: *Chirp* mapejada sobre eixos freqüencial i temporal.

Un cop s'han vist els conceptes bàsics del radar FMCW i dels senyals *chirp* es parlarà sobre l'estimació del rang. Quan el senyal *chirp* és reflectit per un objecte, és només una versió del senyal transmès amb un cert retard temporal, que es pot expressar com $t_{delay} = 2R/c$. Quan es té el *chirp* transmès i el *chirp* rebut, el mesclador en fa la diferència obtenint la freqüència intermèdia, com s'il·lustra en la figura (2.11). Si l'objecte no es mou, s'ha de tenir en compte que aquest blanc produirà un senyal IF que tindrà un to constant en freqüència. Es pot aconseguir la distància a partir de les següents equacions (2.8),(2.9) i (2.10).

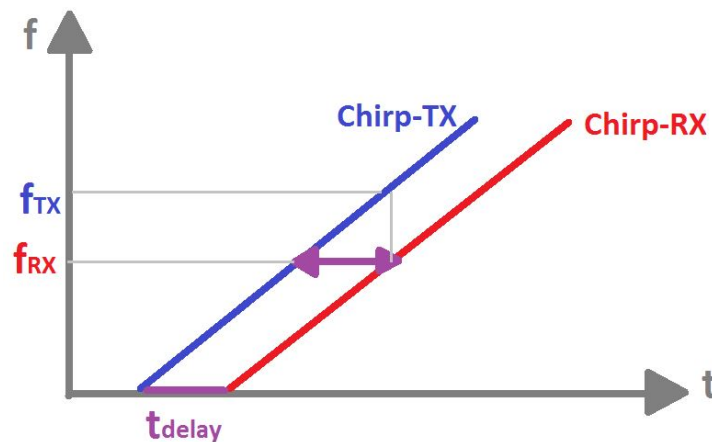


Figura 2.11: Diferència *chirps* Tx i Rx

$$f_{Tx} - f_{Rx} = f_{IF} = \frac{B}{T_{chirp}} t_{delay} \quad (2.8)$$

$$2R = ct_{delay} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{c}{2} \frac{f_{IF}}{B} T_{chirp} \quad (2.10)$$

Quan el senyal sinusoidal resultant es transforma al domini freqüencial fent servir la transformada de Fourier, apareix un pic en l'espectre. Si s'enfinestra amb un pols rectangular, n'apareix un senyal *sinc*. Per tant, cada blanc detectat per el radar, apareixerà en l'espectre freqüencial com un senyal *sinc* a una freqüència IF determinada.

Per acabar aquest apartat, s'han de tenir en compte diferents factors. El primer és la resolució freqüencial, que és inversament proporcional al temps d'observació del radar, com es pot veure en l'expressió (2.11). El segon, la resolució en rang que té el radar, que fa referència a la habilitat que té el radar de diferenciar dos blancs situats a una certa distància entre ells. Aquesta resolució depèn de l'amplada de banda d'escombrat del senyal *chirp*; és a dir, com més amplada de banda, millor resolució espacial (2.12). Finalment, s'ha de tenir en compte que el radar té un rang màxim de detecció, determinat per la freqüència de mostreig, que ha de complir el criteri de Nyquist, l'amplada de banda i el temps de *chirp*. Es veu en l'equació (2.13).

$$\Delta f = 1/T_{obs} \quad (2.11)$$

$$\{\Delta f = \frac{2}{c} \Delta R \frac{B}{T_{sweep}}\} \rightarrow \Delta f > \frac{1}{T_{obs}} \rightarrow \Delta R > \frac{c}{2B} \quad (2.12)$$

$$f_{sampling} > 2B = f_{IF-MAX} = \frac{2}{c} R_{MAX} \frac{B}{T_{sweep}} \rightarrow R_{MAX} = \frac{c}{2B} f_{sampling} T_{sweep} \quad (2.13)$$

2.2.3 Equació de la velocitat

L'estimació de la velocitat es basa en l'efecte Doppler. Això significa que el blanc es mourà de manera relativa al radar, que implica que el blanc canviarà de posició de r a r' i, per tant, el pols rebut també canviarà de fase contínuament en el temps. És equivalent a un desplaçament en la freqüència instantània del senyal rebut.

Quan el blanc es mou respecte al radar, l'estimació en rang augmenta o disminueix segons si el blanc s'allunya o s'apropa, degut a que el retard del senyal passa a ser variable en el temps.

Per a observar l'efecte Doppler s'haurà de mirar atentament el canvi de fase que ho representa. Com s'ha explicat en l'apartat anterior, primer s'haurà d'agafar la mostra del senyal sinusoidal, el senyal *chirp* a una certa freqüència intermèdia IF i transformar-lo al domini freqüencial amb la transformada de Fourier. Al fer això, en resultarà un senyal en l'espectre freqüencial amb la forma d'un senyal *sinc*, i amb una fase corresponent. Es pot observar que amb un sol senyal *chirp* no es pot extreure cap estimació de velocitat, ja que no hi ha cap canvi de fase. Per aquest motiu, s'haurà d'agafar un altre senyal *chirp*, que tindrà una IF diferent (a causa del canvi de posició), per a poder fer el seguiment de la fase. Com a resultat s'obtindrà un nou espectre freqüencial del senyal sinusoidal amb una fase corresponent. La diferència de fases entre la les dues mostres, es pot relacionar directament amb l'efecte Doppler com s'observa en l'equació (2.16).

Com es pot observar a continuació, quan hi ha un petit retard $\Delta\tau$, es converteix en un desplaçament de la fase resultant en (2.14), i en un canvi de freqüència IF en (2.15):

$$f = 2\frac{R}{c} \frac{B}{T_{sweep}} :: \Delta\phi = 2\pi f_c \Delta\tau = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (2.14)$$

$$\Delta f_{IF} = 2\frac{\Delta R}{c} \frac{B}{T_{sweep}} \quad (2.15)$$

S'ha de tenir en compte, que la mesura de velocitat és molt sensible, a causa de que la fase ho és a petits moviments. Això fa que l'evolució de la fase en el temps es pot fer servir per a estimar l'amplitud i la periodicitat de la vibració. Un exemple és utilitzar el radar per fer la monitorització del batut del cor o conèixer la vibració d'un motor.

Quan s'han transmès dos senyals *chirp* separades per un temps T_c , la FFT (*Fast Fourier Transform*) per a cada un dels senyals tindrà pics al mateix lloc, però tindran una fase diferent. La diferència de fase mesurada, correspon a la moció de l'objecte, $v\Delta T_c$.

$$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} \nu T_c \rightarrow \nu = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\omega}{T_c} \quad (2.16)$$

Ara, s'ha vist com es fa l'estimació de velocitat en el cas de només tenir un blanc. Quan es tenen diferents blancs i interessa fer una estimació de les velocitats, el procés a realitzar és diferent. Per exemple, si tenim dos blancs equidistants apropant-se al radar, amb la FFT en rang podem observar que el valor del pic és el mateix en els dos casos, però té fasors de cada un dels objectes, per tant, no es podrà fer una diferenciació.

Un cop s'hagi fet la FFT en rang, per a poder diferenciar objectes equidistants, es pot procedir realitzant una transformada de Fourier en temps, anomenada FFT Doppler, com es

pot observar en la figura (2.12). D'aquí en resulta una graella, on cada element, anomenat *bin*, conté la informació del rang i la velocitat dels blancs.

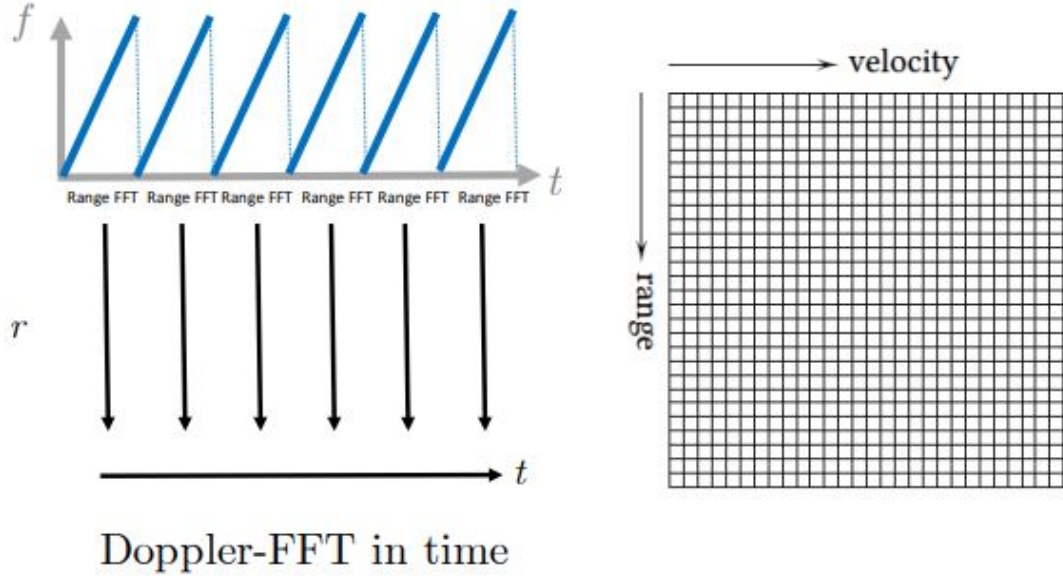


Figura 2.12: Fast ramp FMCW radar: Doppler FFT

Quan el blanc s'allunya del radar, resulta en un canvi de fase Doppler $\omega_{dop} > 0$ i una velocitat $v > 0$. Si el blanc es mou cap al radar, és a dir, s'apropa, el canvi de freqüència és $\omega_{dop} < 0$ i la velocitat és $v < 0$. La mesura és fiable, és a dir, no és ambigua només si el valor absolut del canvi de fase és més petit que π radians, ja que sinó, no es sap si el blanc s'apropa o s'allunya. D'aquí se'n treu la velocitat màxima que es pot mesurar segons l'expressió (2.17), que com menys espai entre *chirps*, més gran és la velocitat màxima.

$$\frac{4\pi}{\lambda} \nu T_c = \omega < \pi \rightarrow \nu_{max} < \frac{\lambda}{4T_c} \quad (2.17)$$

El resultat d'aplicar la segona FFT (Doppler-FFT) a la seqüència de fasors corresponents a la FFT en rang, es resol en el domini freqüencial amb l'espectre dels diferents blancs com es pot observar en la figura (2.13).

Com s'ha vist en el cas de l'estimació en rang, s'ha de tenir en compte un factor en l'estimació de la velocitat. Aquest factor és la resolució en velocitat de la FFT Doppler, que correspon a la mínima separació entre la velocitat 1 i la velocitat 2, mostrades en la figura (2.14), per a que es mostrin dos pics en l'espectre. És inversament proporcional al temps de trama (*frame time*, T_f) Correspon a l'expressió (2.18).

$$\Delta\omega = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\nu T_c :: \Delta\omega > \frac{2\pi}{N} \rightarrow \Delta\nu > \frac{\lambda}{2NT_c} \quad (2.18)$$

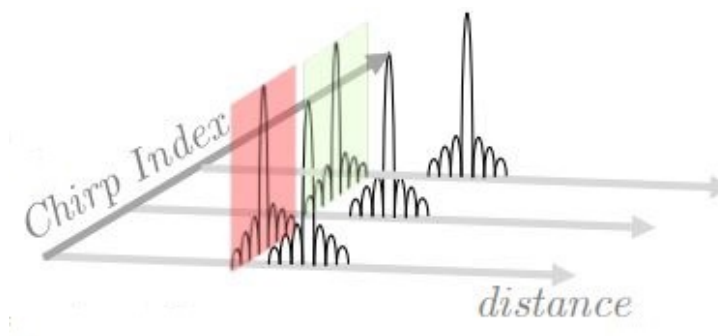


Figura 2.13: Espectre de la FFT Doppler

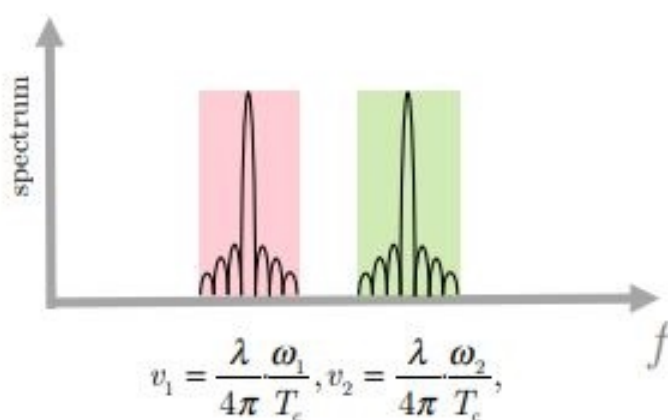


Figura 2.14: Espectre dos pics de FFT Doppler

2.2.4 Equació de la posició angular

Un cop s'ha parlat de l'estimació en distància i en velocitat, es pot arribar a pensar, si es tenen diferents objectes situats equidistantment del radar i movent-se cap al sistema a la mateixa velocitat, no es podran diferenciar els respectius espectres un cop feta la FFT Doppler. Per això és important saber l'angle d'arribada (AoA) de l'ona reflectida pel blanc. Això, ens donarà també, juntament amb la distància a la que es troba el blanc del radar, la posició exacta de l'objectiu.

Per a poder estimar el AoA, el sistema radar necessitarà com a mínim dues antenes receptores, per a fer una diferenciació a l'hora de l'arribada de l'ona, com s'il·lustra en la figura (2.15). Per a mesurar el AoA d'un objecte amb diferents antenes receptores, s'ha de fer la FFT Doppler, i així, extreure que hi ha un canvi de fase entre la mesura d'una antena i la de l'altra. Aquesta diferència de fase pot ser utilitzada per a estimar aquest angle d'arribada de l'objecte de la manera il·lustrada en (2.19). Existeix una tercera FFT, anomenada FFT en angle, que correspon a fer la FFT a la seqüència de fasors corresponents a la 2D-FFT (FFT en rang i FFT

Doppler) i serveix per a resoldre l'angle d'arribada dels objectius respecte al radar per a poder diferenciar-los.

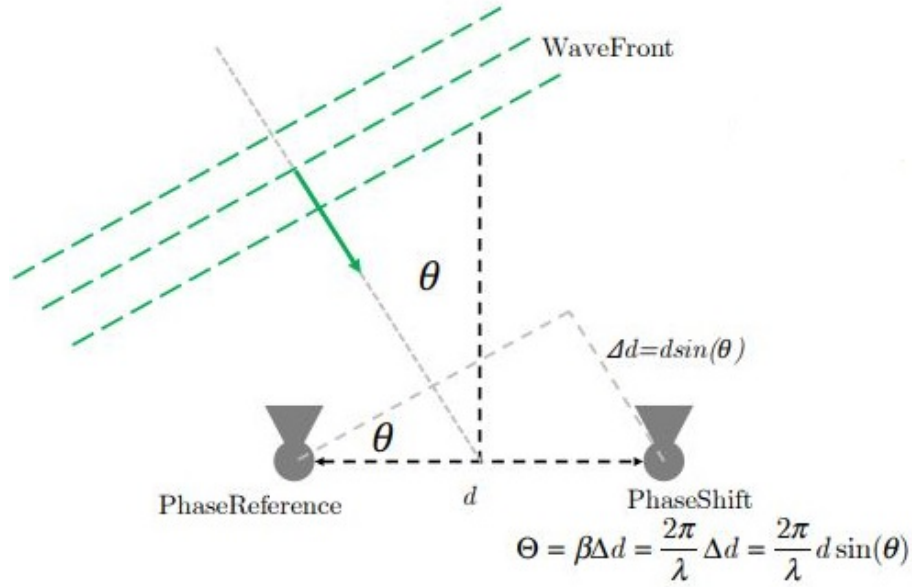


Figura 2.15: Arribada de l'ona a diferents antenes

$$\omega = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \rightarrow \theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \omega}{2\pi d}\right) \quad (2.19)$$

S'ha de tenir en compte, que quan $\theta = 0$, ω és molt més sensible a petits canvis en θ . En canvi, a mesura que s'incrementa θ , la sensibilitat de ω respecte theta redueix fins a arribar a 0 quan $\theta = 90$.

També, s'ha de tenir en compte que hi ha resolució en angle, que es refereix al mínim angle de separació entre dos objectes per fer aparèixer pics separats en la FFT en angle segons l'angle d'arribada θ_n . Aquesta resolució es defineix com (2.20), on Nd : Longitud de l'array d'antenes.

$$\theta_{res} = \frac{\lambda}{Nd \cos(\theta)} \quad (2.20)$$

2.2.5 Altres

En la següent taula es pot apreciar una taula resum amb les diferents formules típiques del radar de FM-CW (2.2).

Element	Equació
Forma d'ona	$e^{j2\pi(f_c+0.5Kt)t}$
RCS	$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\varphi_{radar}}{\varphi_i}$
Densitat potències	$\varphi_i = \frac{ \vec{E}_i ^2}{\eta}, \varphi_{radar} = \frac{ \vec{E}_{radar} ^2}{\eta}$
Senyal <i>chirp</i>	$f(t) = f_c + (B/T_{chirp})t$
<i>Chirp slope</i>	$S_{chirp} = \frac{B}{T_{chirp}}$
Freqüència IF	$f_{Tx} - f_{Rx} = f_{IF} = \frac{B}{T_{chirp}} t_{delay}$
Distància (<i>range</i>)	$R = \frac{c}{2} \frac{f_{IF}}{B} T_{chirp}$
Resolució freqüencial	$\Delta f = 1/T_{obs}$
Resolució en distància	$\Delta R > \frac{c}{2B}$
Distància màxima	$R_{max} = \frac{c}{2B} f_{sampling} T_{sweep}$
Canvi de fase	$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$
Canvi IF	$\Delta f_{IF} = 2 \frac{\Delta R}{c} \frac{B}{T_{sweep}}$
Velocitat	$\nu = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\omega}{T_c}$
Velocitat màxima	$v_{max} < \frac{\lambda}{4T_c}$
Resolució en velocitat	$\Delta \nu > \frac{\lambda}{2NT_c}$
Angle d'arribada (AoA)	$\theta = \arcsin(\frac{\lambda \omega}{2\pi d})$
Resolució en angle	$\theta_{res} = \frac{\lambda}{N d \cos(\theta)}$
Relació senyal/soroll	$SNR = \frac{P_t G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \frac{1}{k T_A B F} \frac{P_t G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \frac{N T_{sweep}}{k T_A F}$

Taula 2.2: Taula resum de fórmules

Capítol 3

Radar a 77 GHz: IWR1642Boost

En aquest capítol es parlarà del radar sobre el qual s'ha treballat. S'explicaran les característiques, els paràmetres i l'estructura del radar. Tot seguit, s'exposarà la seva posada en marxa, i els diferents camins seguits per a aconseguir-ho. Els documents relatius al radar són [Texa], [Texc], [Texb] i [Texd].

3.1 IWR1642Boost

El sistema radar utilitzat per a realitzar aquest treball és el mòdul integrat IWR1642Boost de *Texas Instruments*. La placa integrada IWR1642Boost de TI és una placa d'avaluació fàcil d'usar per al sensor *mmWave* IWR1642, amb connectivitat directa al microcontrolador. El dispositiu IWR1642 és un sensor *mmWave* integrat d'un sol xip basat en la tecnologia radar FM-CW, amb la capacitat de funcionar des de 76 GHz a 81 GHz amb un xip d'amplada de banda continu de fins a 4 GHz. Aquest dispositiu és una solució ideal per a sistemes radar curts de baixa potència, auto-controlats en aplicacions industrials com l'automatització d'edificis, de fàbrica, drons...

3.1.1 Hardware

El dispositiu IWR1642 és una solució autònoma i d'un sol xip que simplifica la implementació de sensors *mmWave* en la banda de 76 a 81 GHz. La placa sobre la que es treballa, és la placa proporcionada per *Texas Instruments*, IWR1642Boost. Aquesta placa inclou el dispositiu radar IWR1642, que a la vegada inclou una implementació monolítica de dues antenes transmissores (2 Tx) i de quatre antenes receptores (4 Rx) amb convertidors PLL (*Phased-Locked Loop Converter*) i A2D (*Analogic To Digital Converter*). També integra un sistema DSP (*Digital Signal Processor*), que conté el DSP C674x de TI (*Texas Instruments*) per al processat de senyals de radar. També inclou un subsistema de processador basat en R4F, ARM, responsable de la

configuració, control i calibratge de la part *front-end*. En les figures (3.1) i (3.2) es pot observar l'estructura de la placa.

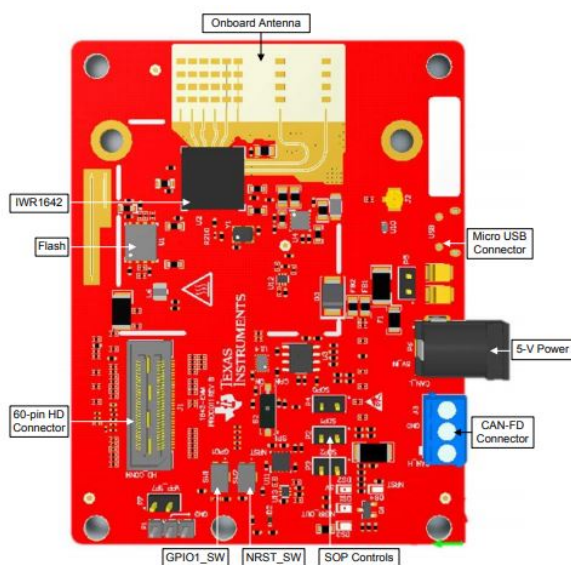


Figura 3.1: Vista cara davantera placa IWR1642Boost

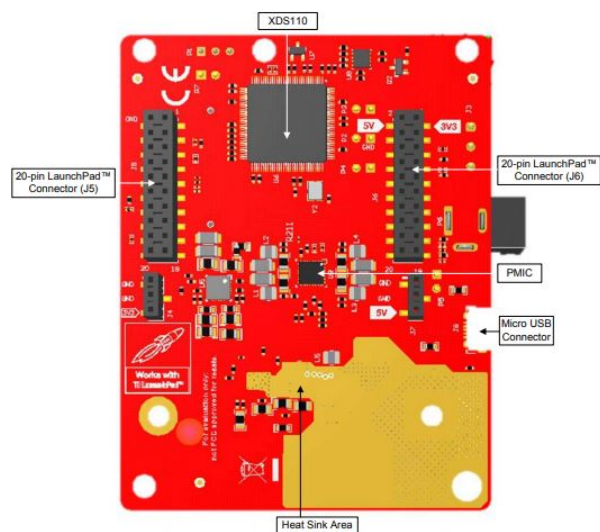


Figura 3.2: Vista cara posterior placa IWR1642Boost

Tot seguit, s'exposaran les característiques de la placa:

- Transceptor: Dispositiu encarregat tant de la transmissió i la recepció dels senyals.
 - PLL i convertidor analògic a digital integrats.
 - Cobertura de 76 GHz a 81 GHz, amb 4 GHz d'amplada de banda contínua.
 - Quatre canals receptors.

- Dos canals transmissors.
- Monitorització.
 - Control basat en ràdio ARM Cortex-R4F.
 - *Firmware* integrat.
 - Sistema d'auto-calibratge de freqüència i temperatura.
- DSP c674x per processat de senyal FM-CW.
- Memòria en xip de 1.5 MBytes.

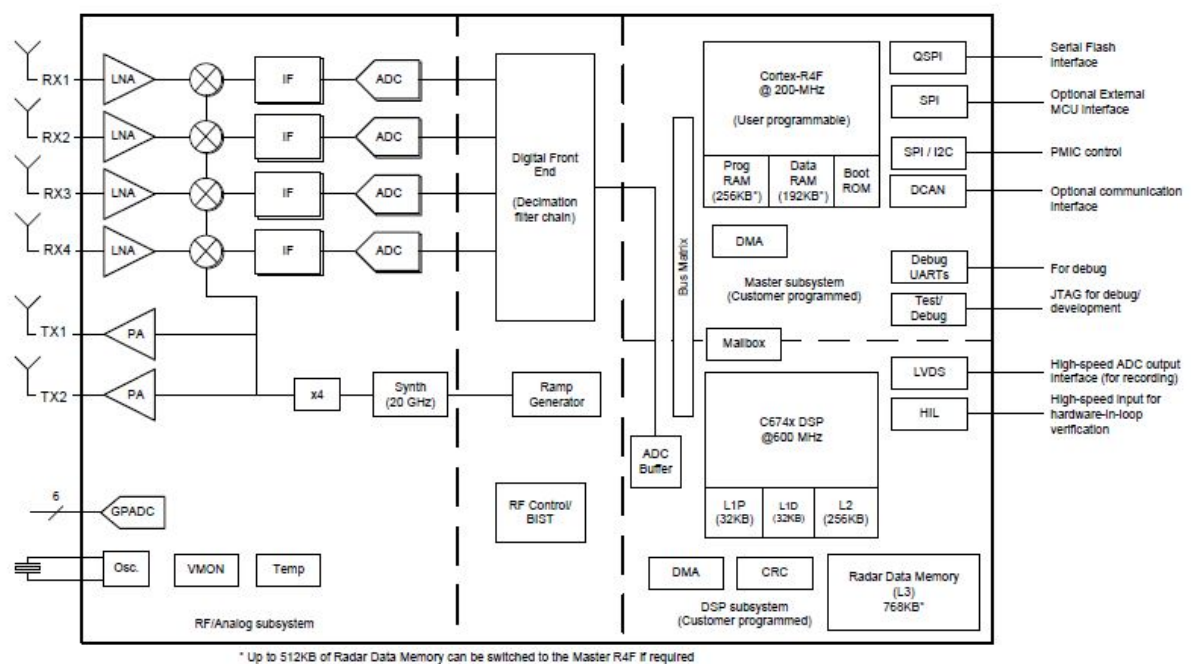


Figura 3.3: Diagrama de blocs: IWR1642Boost

En el diagrama de blocs es poden observar els diferents subsistemes que té el dispositiu radar. La part de radiofreqüència (RF) inclou el sintetitzador, el PA, el amplificador de baix soroll (LNA), mesclador, filtre IF i el ADC. Els dos canals transmissors poden ser operats per separat o simultàniament, igual que els quatre canals receptors.

En la placa IWR1642Boost, el subsistema de transmissió, consisteix en duess cadenes paral·leles de transmissió, cada una, independent en fase i amplitud de control. Com a màxim es pot entregar al port d'antena una potència de 12.5 dBm.

El sistema de recepció consta de quatre canals paral·lels. Cada un d'aquests canals, consisteix d'un LNA, un mesclador, un filtre IF, un convertidor analògic-digital... Aquests quatre canals poden operar simultàniament.

El sistema de processat del radar es divideix en dues parts, com s'il·lustra en la figura (3.4):

- Subsistema DSP: Conté el DSP c674x d'alt rendiment, el qual està connectat amb una interconnexió amb molt ample de banda per a molt rendiment, quatre *Direct Memory Access* per a la transmissió de dades, *Low-voltage Differential Signaling* per la mesura de les dades de sortida, *buffers ADC* i unitats de memòria.
- Subsistema màster: Controla tota la perifèria i activitats del dispositiu. Conté el processador Cortex-R4F.

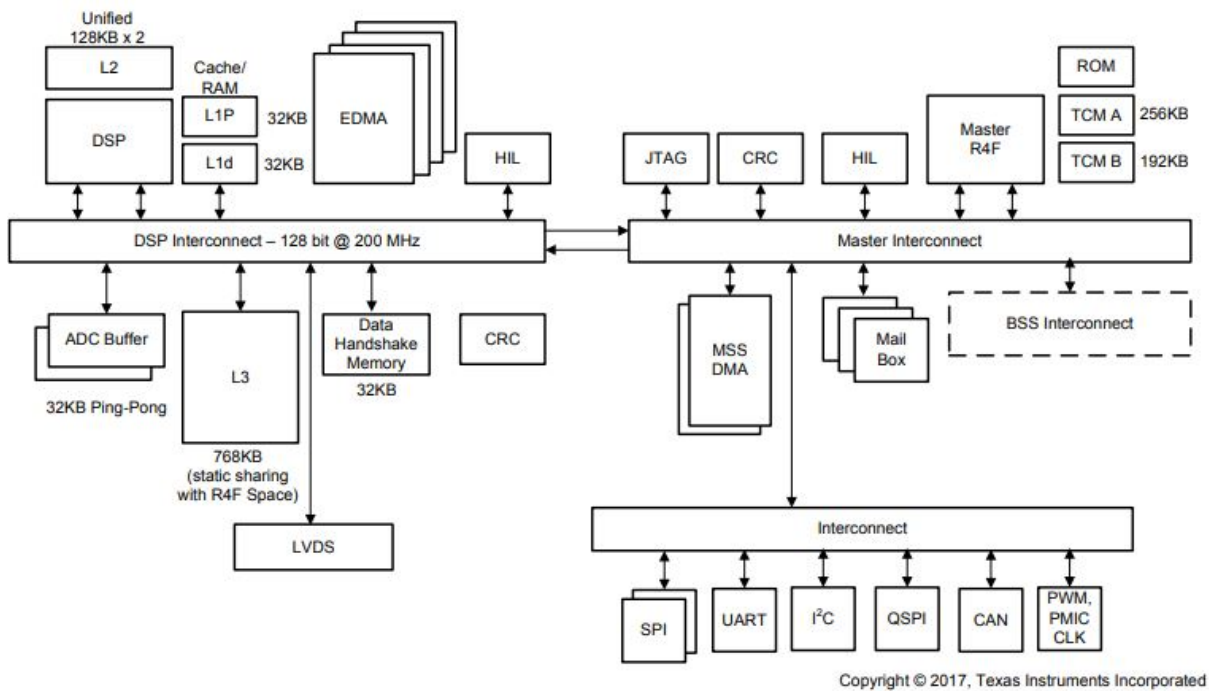


Figura 3.4: Unitat de processament: IWR1642Boost

El sistema d'interfície amb l'usuari conté un port de connexió per a l'entrada i la sortida de dades UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).

Per últim, conté subsistemes de memòria per al processador i pel DSP, així com, un subsistema de canals ADC, amb una freqüència de mostreig de 625 Ksps (*Kilo Samples per Second*).

3.1.2 Antenes

La placa IWR1642Boost inclou antenes gravades per als quatre receptors i els dos transmissors. Permet rastrejar diferents objectes amb la informació sobre la seva distància relativa respecte al radar i l'angle en el que es troben. Aquest disseny permet veure els objectes en un pla bidimensional, ja que no es diferencia en el pla d'elevació. La posició de les antenes es troba segons la següent imatge (3.5) i taula (3.1). Com es pot observar, la distància entre receptors equival a $\lambda/2$. Per a saber les posicions de les antenes, es considera la posició 0 el centre de la placa. La placa mesura 65.27 mm, per tant, el centre es troba en 32.635 mm.

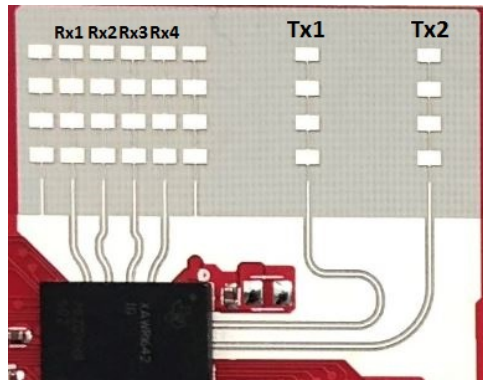


Figura 3.5: Antenes de Rx i Tx

Antena	Posició relativa respecte centre de la placa
Tx1	+ 2.5 mm
Tx2	+ 10 mm
Rx1	- 12 mm
Rx2	- 10 mm
Rx3	- 8 mm
Rx4	- 6 mm

Taula 3.1: Posició relativa antenes respecte centre placa

El guany màxim de l'antena és > 9 dBi en la banda freqüencial de 76 a 81 GHz. La potència màxima de sortida amb el guany inclòs és de < 55 dBm EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*), com exigeix la unió europea. La radiació de l'antena és: pla horitzontal (pla H $\phi = 0^\circ$), pla vertical (pla E $\phi = 90^\circ$).

En les següents figures es poden observar els patrons de les antenes transmissores, juntes i per separat.

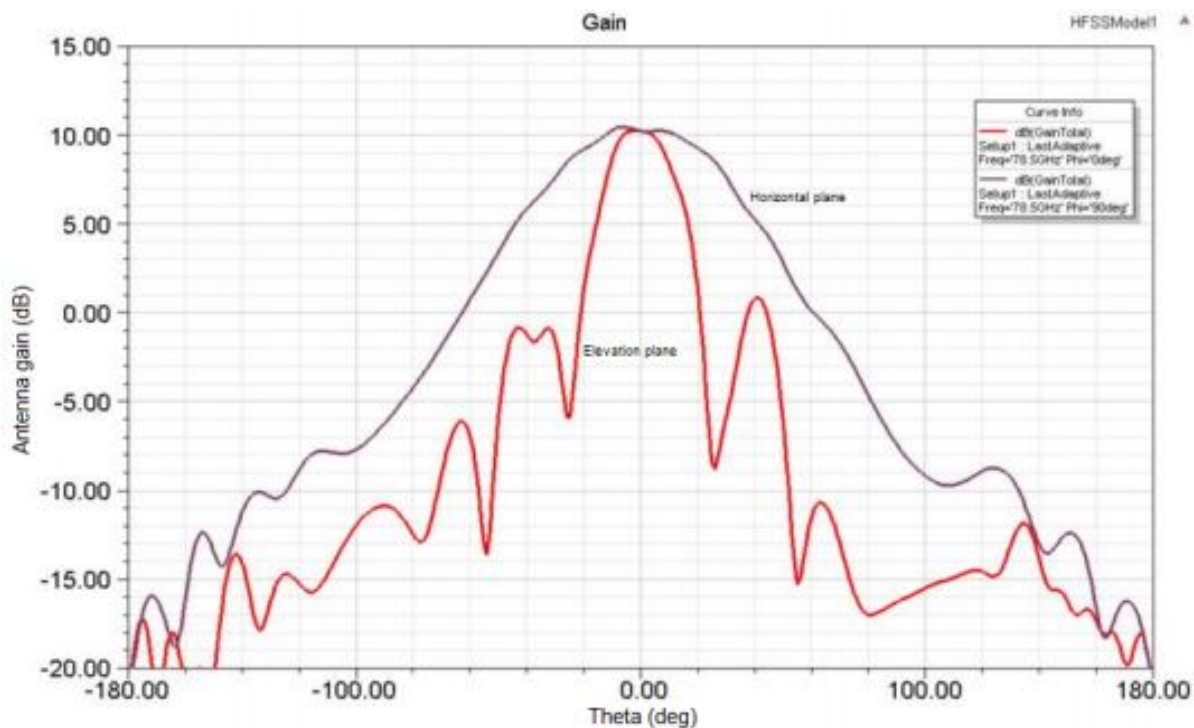


Figura 3.6: Patró antenes transmissores

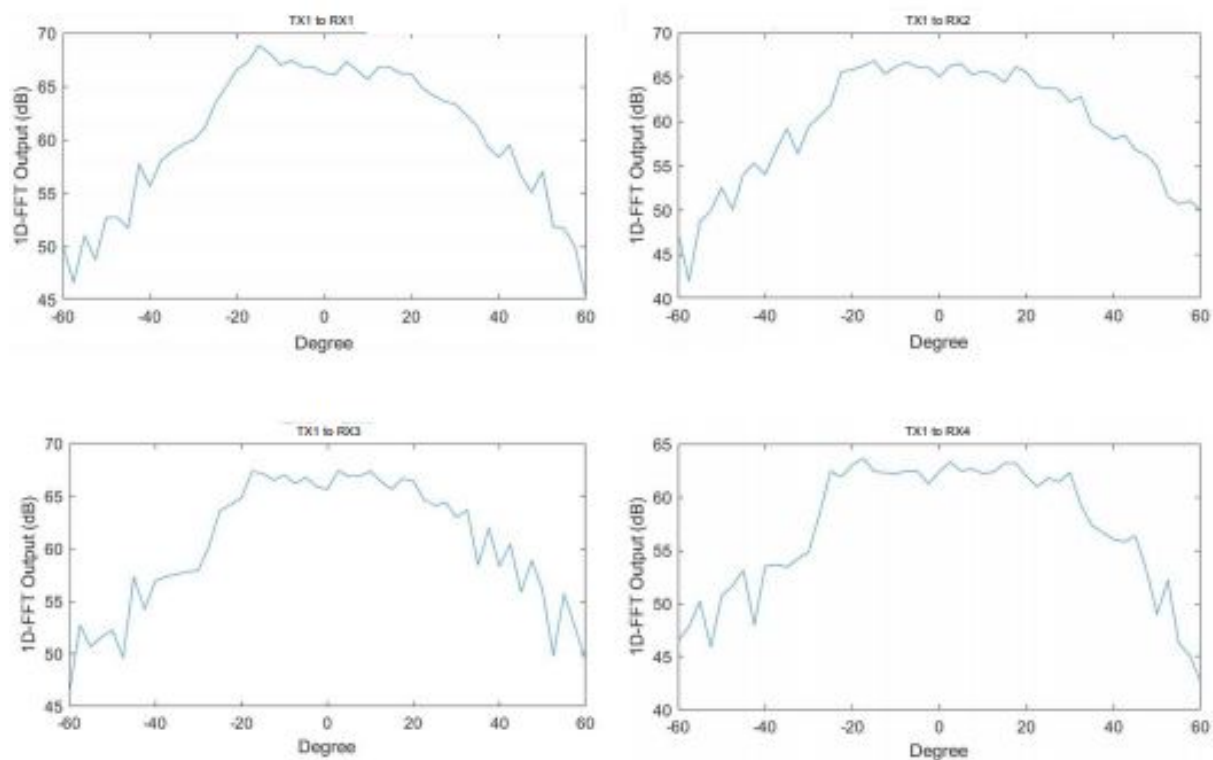


Figura 3.7: Patró en azimuth de l'antena Tx1

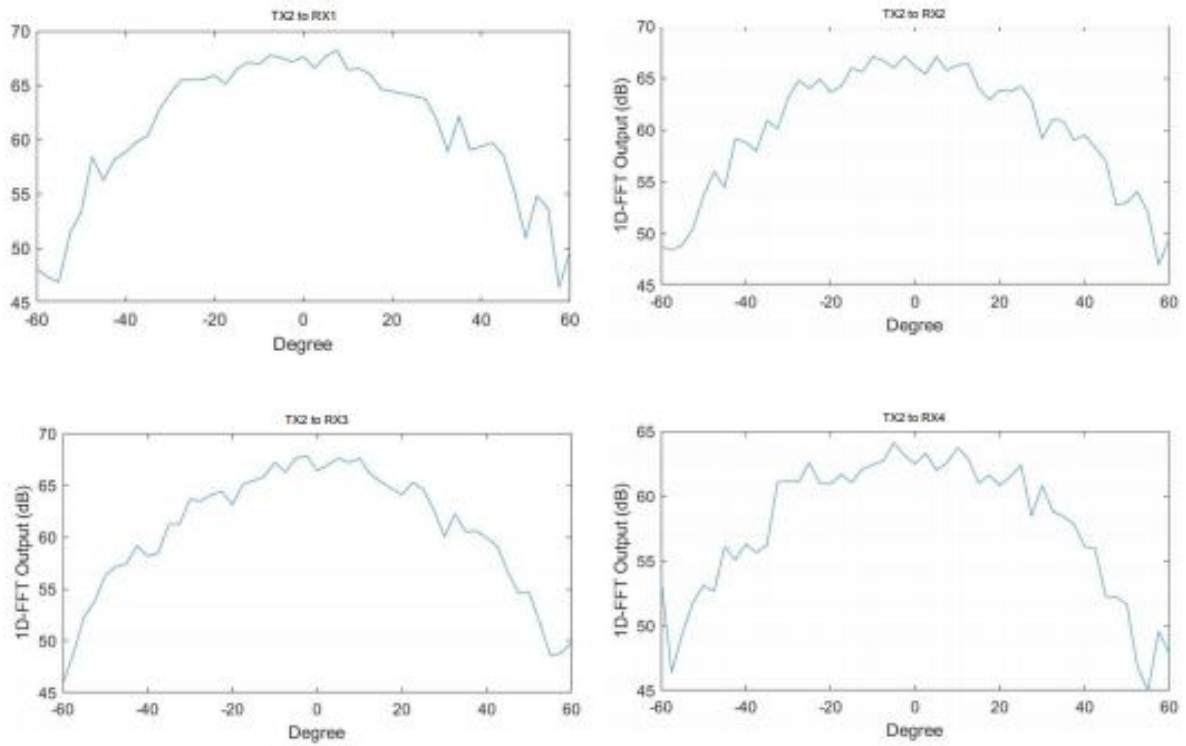


Figura 3.8: Patró en azimuth de l'antena Tx2

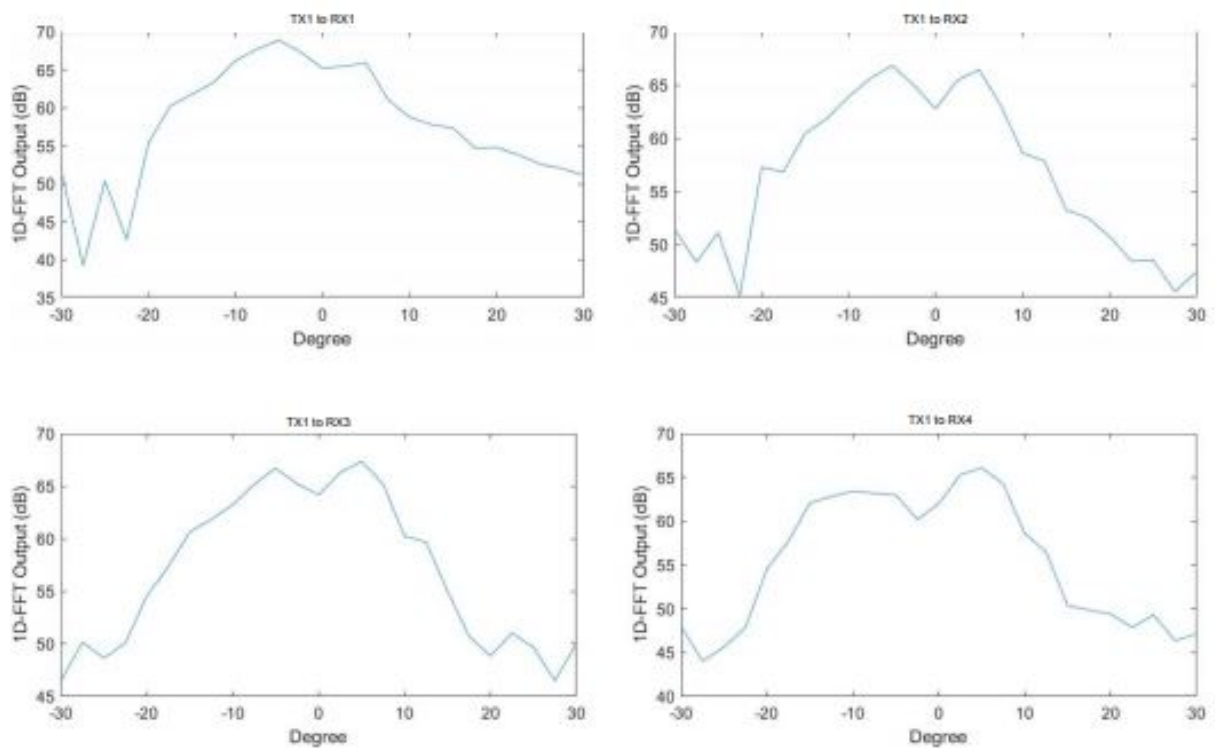


Figura 3.9: Patró en elevació de l'antena Tx1

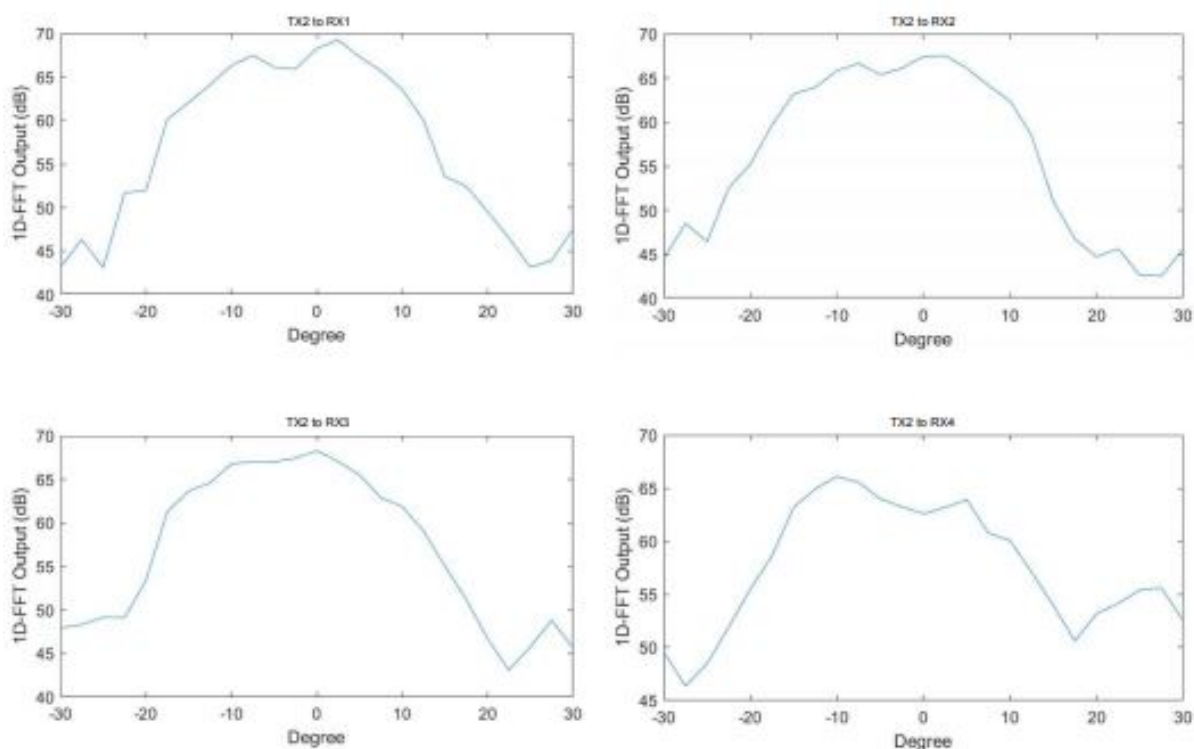


Figura 3.10: Patró en elevació de l'antena Tx1

3.1.3 Connectivitat potència i placa-PC

La placa és potenciada per un *power jack* femella de 5-V, tant aviat com es connecta, el LED NRST de la placa s'il·lumina, indicant que la placa està encesa.

La connectivitat placa-ordinador es realitza a partir de connexió micro-USB a partir del controlador XDS110. Aquesta connexió prové les següents interfícies amb l'ordinador: connectivitat JTAG per al *Code Composer Studio* (CCS), port UART (*Class Application/User UART*) per on s'envien les CLI (*Command Line Interface*) per a executar les funcions amb el radar, i un port MSS UART (*Class Auxiliary Data Port*) per a les dades.

3.2 Posada en marxa

En aquesta secció es parlarà de tots els passos que s'han anat seguint per a poder posar en marxa la placa de *mmWave* IWR1642Boost.

3.2.1 Programari

Per a poder inicialitzar el radar i poder realitzar operacions entre l'ordinador i el radar s'han de tenir uns certs components instal·lats, tant al radar com a l'ordinador. Tot seguit, es presentaran els accessoris a instal·lar:

- *Code Composer Studio* (CCS): Aquest programa, de *Texas Instruments*, és un entorn de desenvolupament integrat que suporta als microcontroladors i processadors incorporats de TI. Inclou un conjunt d'eines que s'utilitzen per desenvolupar i depurar aplicacions. Inclou un compilador C/C++, editor de codi font, entorn de construcció de projectes...
- *XDS Emulation Software Package*: El paquet de programari d'emulació XDS conté controladors de depuració de la classe TI XDS. Inclou les unitats de depuració JTAG per als dispositius amb processadors com ARM Cortex, C2000... Aquest paquet permet que l'ordinador detecti els dos ports/USB de sortida del radar IWR1642Boost.
- *mmWave SDK (Software Development Kit)*: El kit de desenvolupament de programari de *mmWave* és una plataforma de programari unificada per els sensors de TI, que proporciona una configuració fàcil i un accés ràpid a l'avaluació i al desenvolupament.
- *UniFlash Cloud Service (Offline Version)*: CCS Uniflash és una eina independent per a programar memòria en xip a microcontroladors de TI.
- *mmWave Demo Visualizer* (opcional): Aquesta eina està dissenyada per a caracteritzar i avaluar els sensors de TI. Els sensors de *mmWave* estan configurats i controlats des de *mmWave Studio* enviant ordres als dispositius sobre el bus SPI. És una eina de demostració i l'estudi de detecció *mmWave*.
- *TI CloudAgent Bridge*: Permet la interconnexió entre els dispositius TI amb el programari en el núvol.

3.2.2 Primer contacte

Per a posar en marxa el radar, es van seguir diferents passos. El primer que es fa és comprovar si el radar funciona adequadament sobre les plataformes de proves proporcionades per *Texas Instruments*. Per aquest motiu, és necessària la instal·lació sobre la placa del *mmWave* SDK

corresponent. Per a poder realitzar la instal·lació corresponent s'ha de tenir en compte un factor molt important: s'ha de tenir coneixença sobre quin tipus de versió de *Software Development Kit* pot suportar la placa. Hi ha dos casos: que la placa sigui de la versió ES1.0 o de la versió ES2.0. Segons la versió a la que pertanyi, hi haurà versions del SDK que no podran utilitzar-se.

En el cas de la placa que es fa servir per a realitzar aquest projecte, pertany a la versió ES1.0. Això implica que no es poden usar versions superiors al SDK 2.00, a causa de noves actualitzacions realitzades per a plaques fabricades més recentment. Per això, és recomanat instal·lar el SDK 1.02. Aquest kit aporta el programari adequat al radar, per al seu correcte funcionament en algunes aplicacions, com per exemple en el *mmWave Demo Visualizer*.

Un cop el programari està instal·lat, es pot navegar a la versió *online* del programa de visualització, on apareixen els primers inconvenients. La versió actual del visualitzador de TI, la 3.0, no funcionava per a la versió del radar instal·lada. Això era a causa de que l'aplicació permetia la interacció de radars més recents, però no amb el radar del que es disposava. Aquest problema es va solucionar demanant a *Texas Instruments* la utilització d'una versió anterior del visualitzador, la 2.0. Aquesta versió sí que suportava la versió del radar, i es va poder fer el primer contacte amb les diferents mesures del radar, així com, la seva configuració.

3.2.3 *mmWave Demo Visualizer*

L'aplicació que es va utilitzar per a fer la primera presa de contacte amb les funcionalitats del radar va ser el *Microsoft Demo Visualizer* proporcionat per Texas, en la seva versió 2.0. És un programari fàcil de manipular. Es divideix en dues parts principals: la part de configuració del radar i la part de visualització dels resultats. Per a poder fer interactuar la placa amb aquest programari es necessita la instal·lació del *plug-in* de TI, *CloudAgent Bridge*.

Per a començar, la placa s'ha d'engegar abans d'obrir l'aplicació, a causa de problemes de detecció si es fa en l'ordre advers. Per a fer la configuració des de l'aplicació del radar, s'han de configurar els ports mencionats anteriorment. La configuració es pot observar en la figura (3.12). Com es pot observar, hi ha dos ports sèrie que s'han de connectar: el port CFG port i el DATA port. En el port CFG s'ha de connectar amb l'entrada USB del radar "XDS110 Class Application/User UART", amb el valor per *default*. En el port DATA es connectarà l'entrada USB "XDS110 Class Auxiliary Data Port". El número de port COM corresponent als dos USB mencionats anteriorment es poden veure en l'administrador de dispositius de Windows (3.11).

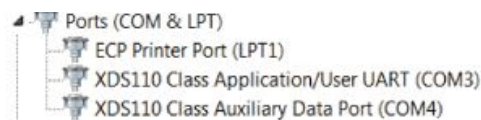


Figura 3.11: Administrador de dispositius, ports

Per l'entrada del port CFG, l'aplicació de visualització, enviarà els comandaments CLI (*Command Line Interface*) indicats. Per l'entrada del port DATA arribaran les dades del radar, per a fer les pertinents operacions de visualització. Un cop s'hagin connectat ambdós ports, en la part inferior esquerra, apareix un missatge mostrat en la figura (3.13).

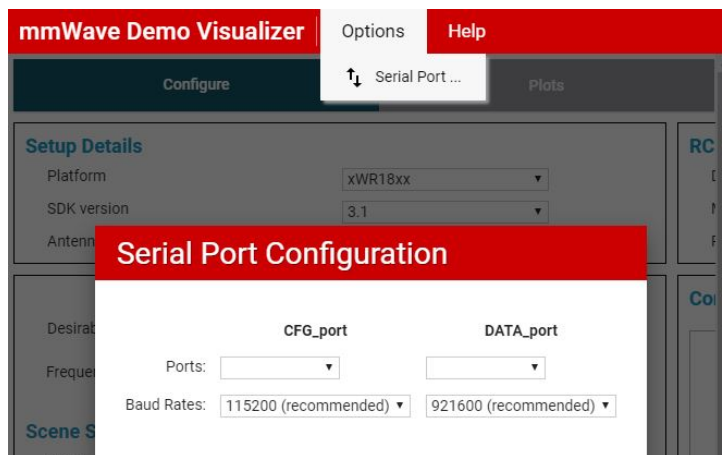


Figura 3.12: *Serial Port Configuration Demo Visualizer*

Un cop el dispositiu estigui connectat, es pot procedir a la configuració del dispositiu des d'una de les parts del visualitzador. Des d'aquesta part, mostrada en (3.14), es poden modificar alguns paràmetres segons el que es vulgui realitzar amb el radar, com per exemple, la RCS desitjada, o la velocitat màxima desitjada. Un cop s'hagi preparat la configuració corresponent, es pot continuar enviant la configuració al dispositiu (*Send Config to mmWave Device*). La consola de missatges mostrarà les diferents CLI enviades al radar.



Figura 3.13: Missatge connexió ports

Un cop s'hagi mostrat en la consola de missatges que s'ha efectuat amb èxit la connexió, es podrà canviar de pestanya per a visualitzar els resultats obtinguts. En la pestanya (*Plot tab*), mostrat en la figura (3.15), es podran visualitzar diferents gràfics, segons el que més convingui. Els més habituals són el gràfic de les coordenades X i Y dels objectes detectats, el *Range Profile* on es mostraran els blancs detectats com a pics en la gràfica, una tercera gràfica de l'efecte Doppler i finalment una gràfica del consum de la CPU. També es pot observar una taula on apareixen les característiques a les que està treballant el radar, com per exemple, la freqüència, el *slope chirp*...

A partir d'aquesta aplicació, es va poder comprovar que el radar funcionava amb normalitat i que operava bé a partir de les aplicacions proporcionades per TI.

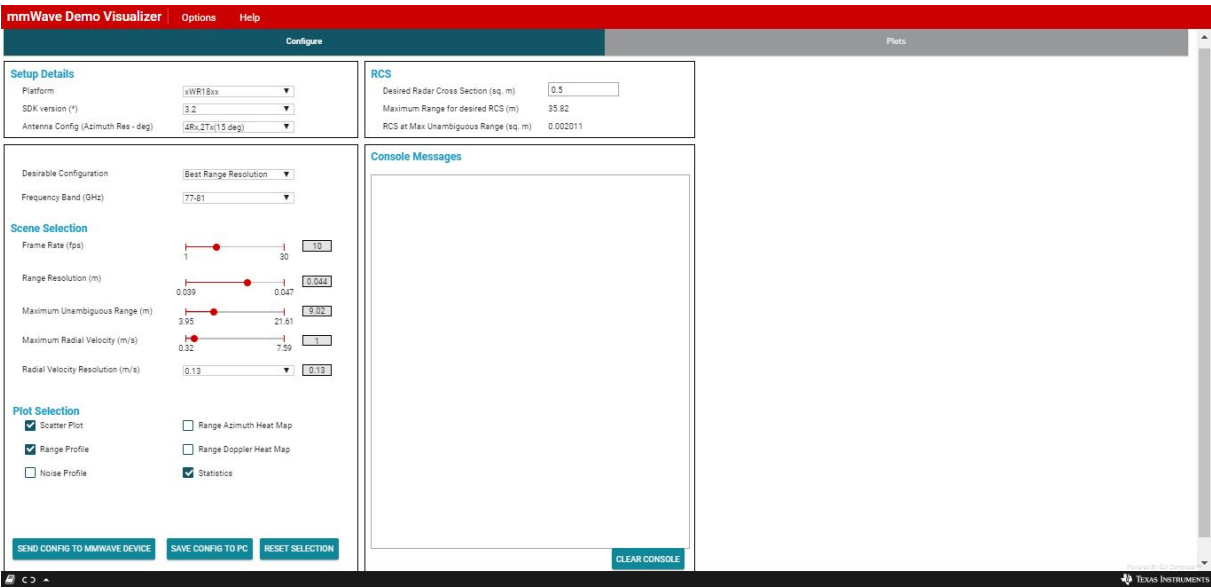


Figura 3.14: Configuration tab Demo Visualizer

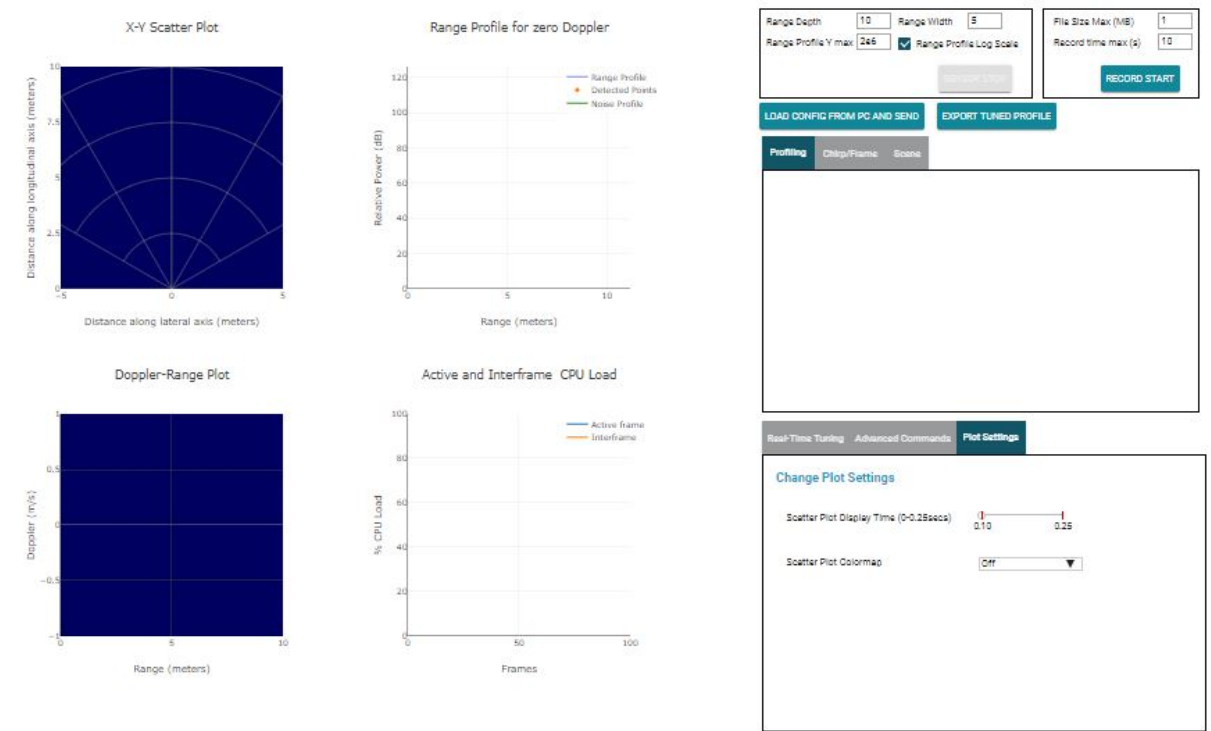


Figura 3.15: Plot tab Demo Visualizer

3.2.4 *Code Composer Studio (CCS)*

Una vegada comprovat que el radar funcionava amb normalitat es va procedir a intentar fer-lo funcionar enviant les CLI desitjades. Per a realitzar-ho, es requereix la instal·lació del programa *Code Composer Studio*. Aquest programa permet la programació dels codis necessaris continguts en el *mmWave* SDK per al correcte funcionament del radar. És un entorn de programació en el llenguatge de baix nivell C/C++.

El primer pas va ser utilitzar entorns programats proporcionats per *Texas Instruments*, i en van sorgir els primers problemes. Tots els entorns programats proporcionats per TI, són fets per a versions més recents del radar, per tant, la programació del codi estava desconfigurada. El segon pas, al veure que els entorns estaven desconfigurats, va ser intentar fer la programació d'un codi simple des del qual es poguessin modificar els paràmetres i funcions de la placa. Per la poca disponibilitat de temps, a part de la complexitat que suposava, no es va poder realitzar un codi propi per al funcionament del radar. Així doncs, es va procedir a utilitzar llibreries proporcionades per TI modificant el codi per al correcte funcionament amb la versió actual del radar.

Un cop es realitzi el procés de recopilació del codi necessari, el següent pas és compilar-lo sobre la plataforma CCS. Un cop s'hagi compilat correctament, en resulta un arxiu en format *.bin*, que conté la imatge per a poder cremar-la a sobre el *software* de la placa.

3.2.5 *UniFlash*

Un cop des del CCS s'hagi extret l'arxiu en format *.bin*, es procedirà a cremar el codi a la placa. Per a fer-ho, és necessària la instal·lació de l'eina *Uniflash* proporcionada per TI. Aquesta eina és fàcil de manipular. Et permet realitzar la connexió amb la placa de manera semblant a la connectivitat amb el visualitzador de TI. Un cop la connexió s'hagi realitzat amb èxit, es procedeix a cremar l'arxiu *.bin* al microprocessador de la placa, per tal de que realitzi les funcions indicades en el codi.

3.2.6 Extracció de dades del radar

Un dels factors més importants del procés de funcionament del radar és l'extracció de dades del radar. Això és perquè per a aprendre a manipular el radar, i adquirir coneixements sobre el seu funcionament, és de vital importància. Per a l'extracció de dades en temps real de la placa IWR1642Boost, són necessàries dues plaques addicionals, la placa *mmWave DevPack* que permet la interconnexió del radar i de la segona placa necessària, DCA1000EV, que és la que permet l'extracció de les dades des del *front end*, on encara no han sigut processades per el DSP.

En aquest projecte, no es disposava de la última placa mencionada, per tant, es va haver de buscar una altra manera de poder extreure les dades del radar.

Per a poder manipular les dades del radar, es va intentar accedir a l'entrada del mòdul DSP a partir de programes realitzats al CCS. Accedir a aquest punt és molt interessant ja que les dades encara no han estat tractades, i, per tant, la manipulació d'aquestes per a veure resultats és millor, ja que pots observar determinats paràmetres que no es poden observar a la sortida del DSP, a causa de les operacions realitzades. Després de molts intents, no es va poder accedir a les dades a l'entrada del DSP (queda per fer en un futur treball), i es van haver d'agafar les dades a la sortida del DSP, per a poder interactuar amb els resultats possibles del radar, seguint el procés explicat a continuació.

Després d'un llarg temps de cerca, navegant pels fòrums de TI, es va aconseguir trobar un programa derivat del programa utilitzat per a executar la visualització de la *Demo* que et permetia usar una eina del *mmWave Demo Visualizer* per a la captura de dades.

Abans de poder utilitzar el radar, es va agafar el programa i es va compilar amb el CCS, el qual va donar alguns errors en el procés, degut a que no era un programa actualitzat per la versió del radar utilitzat. Quan es va acabar de modificar el codi per a la correcta compilació, es va obtenir l'arxiu *xwr16xx_mmw_demo_1.bin*. Tot seguit, es va procedir a la cremació de l'arxiu al radar utilitzant el programa *Uniflash*. Per a poder realitzar la crema del codi a la placa, s'ha de connectar el SOP 2 que permet entrar en mode *debug* al radar. Un cop cremat l'arxiu, s'ha de retirar el SOP 2 i connectar el SOP 1 que és quan la placa entra en mode funcional.

Finalment, per obtenir les dades generades per el radar, es necessita l'aplicació de TI *mmWave Demo Visualizer*. Un cop inicialitzada la connexió amb el radar, en la finestra de *plot*, hi ha una opció, il·lustrada en la figura (3.16), que et permet extreure un arxiu en format *.dat* que conté les dades extretes del radar després de passar pel DSP. S'ha de tenir en compte, que això resulta un inconvenient, ja que les dades obtingudes ja han passat algunes operacions realitzades pel DSP, però és l'única manera viable de poder obtenir les dades per a realitzar el treball a temps. Aquesta eina de captura de dades et permet obtenir una mesura determinada per un temps que s'introdueix o per una mida de fitxer determinat. Les diferents CLI enviades al radar es poden observar en (3.17).

3.2.7 Altres: CLI *Console Message*

En aquesta secció es parlarà sobre les CLI de la placa IWR1642Boost. Són les línies de codi enviades des de l'aplicació de visualització a la placa per a tal de que funcioni amb la funcionalitat descrita per a la captura de dades.

Una interfície de línia d'ordres (CLI) és un mètode de manipulació a partir d'instruccions

Figura 3.16: Eina de captura de dades

escrites al programa desitjat. S'interacciona de la manera més simple possible. Si el programa respon s'observa en les línies següents.

Les línies CLI més importants que se li envien a la placa per a l'extracció de dades són:

- *dfeDataOutput Mode 1/3*: Com és la sortida de dades.
 - 1: *Frame based configuration*.
 - 3: *Avanced frame configuration*.
- *channelCfg 15 3 0*: Configura el canal.
 - 15: Número d'antenes receptores desitjades, 4 antenes receptores = $0x1111b = 15$.
 - 3: Número d'antenes transmissores en azimuth desitjades, 2 antenes transmissores desitjades $0x11 = 3$.
 - 0: antenes transmissores en elevació (aquest radar no té la capacitat de mesurar en elevació, per tant, 0).
- *adcCfg 2 1*: Configuració ADC.
 - 2: Número de bits del ADC. Pot ser 0 (12 bits), 1 (14 bits) i 2 (16 bits). IWR162Boost només suporta l'opció 2 (16 bits).
 - 1: Format de sortida del ADC. Pot ser 0 (real), 1 (complex 1x) i 2 (complex 2x). Aquest radar només suporta l'opció 1.
- *adcbfCfg -1 0 0 1 0*: Configuració del *buffer* de l'ADC.
 - -1: Índex de la subtrama, només suporta -1.
 - 0: Format de sortida de l'ADC. Hi ha l'opció 0 (complex) i 1 (real). Ha de ser la mateixa que en el cas anterior.
 - 0: *Sample swap*. Pot ser 0 (component fase I a LSB (*Low Significant Bit*), component quadratura Q a MSB (*Most Significant Bit*)) i 1 (I a MSB, Q a LSB). Aquest radar només suporta 0.

- 1: *Channel Interleave*. Pot ser 0 (amb *interleave*) i 1 (sense *interleave*). Només pot ser sense *interleave*, 1.
- *Threshold* del senyal *chirp*. El *threshold* és un llindar. Pot ser de 0 a 8. Si es deixa a 0 es maximitza la capacitat del *buffer* de l'ADC.
- *profileCfg 0 77 20 5 80 0 0 40 1 256 6000 0 0 30* : Configuració del perfil del radar.
 - 0: Identificador de perfil, qualsevol valor està bé.
 - 77: Freqüència inicial. IWR1642Boost treballa a 77GHz.
 - 20: Temps de desocupació (sense fer res) en μs . Qualsevol valor adequat indicat pel *datasheet*.
 - 5: Temps d'inici del ADC (*ADC Start Time*) en μs . Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 80: Temps de final de rampa en μs . Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 0: Potència de sortida de transmissió. Només s'ha provat el valor 0. Indicant al *datasheet*.
 - 0: Desplaçament en fase de les antenes transmissores. Només el valor 0 s'ha provat.
 - 40: *Frequency Slope* del *chirp*. El valor ha de ser més gran que 0. Indicant al *datasheet*. Unitats de MHz/ μs .
 - 1: Temps d'inici de transmissió en μs . Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 256: Número de mostres del ADC. Qualsevol valor indicat pel *datasheet* múltiple de 4.
 - 6000: Freqüència de mostreig del ADC, unitats de KSPS. Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 0: Freqüència de tall del HPF1 (Primer *High Pass Filter*). Pot ser 0 (175 KHz), 1 (235 KHz), 2 (350 KHz) i 3 (700 KHz). Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 0: Freqüència de tall del HPF2 (Segon *High Pass Filter*). Pot ser 0 (350 KHz), 1 (700 KHz), 2 (1.4 MHz) i 3 (2.8 MHz). Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 30: Guany del receptor en dB. Pot ser de 24 a 48 dB.
- *chirpCfg 0 0 0 0 0 0 0 1*: Configuració de les rampes *chirp*.
 - 0: Índex de començament del *chirp*. Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 1: Índex de final del *chirp*. Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.
 - 0: Identificador de perfil. Ha de coincidir amb el *profileID* del *profileCfg*.
 - 0: *Start Frequency Variations* en Hz. Només s'ha provat el valor 0.
 - 0: *Frequency Slope Variations* en Hz. Només s'ha provat el valor 0.

- 0: *Idle Time Variations* en μs . Només s'ha provat el valor 0.
- 0: *ADC Start Time Variations* en μs . Només s'ha provat el valor 0.
- 2: *Transmision Antenna Enable Mask*. Per a permetre les dues antenes transmissores 2.
- *lowPower 0*: Per a decidir el mode de potència del radar.
 - 0: Mode baixa potència.
 - 1: Sense mode baixa potència.
- *frameCfg 0 0 128 1 20 1 0*: Configuració de la trama.
 - 0: *Chirp Start Index*. Pot ser del valor 0 a 511.
 - 0: *Chirp End Index*. Pot ser del valor escollit a *Chirp Start Index* fins a 511.
 - 128: *Number of loops*. Pot ser de 1 a 255.
 - 1: *Number of frames*. Pot ser de 0 a 65535. Si es posa el valor 0 és infinit el número de trames.
 - 20: *Període de les trames* en *ms*.
 - 1: *Software Select*. Pot ser 0 (*Hardware Trigger*) i 1 (*Software Trigger*). Només suporta 1 el radar.
 - 0: *Frame Trigger Delay* en *ms*. Qualsevol valor indicat pel *datasheet*.

```
*****
Debug: Launching the CAPTURE DEMO
*****

*****
xWR16xx Capture Demo 01.02.00.02
*****
CaptureDemo:/> dfeDataOutput Mode 1
Done
CaptureDemo:/> channelCfg 15 3 0
Done
CaptureDemo:/> adcCfg 2 1
Done
CaptureDemo:/> adcbfCfg -1 0 0 1 0
Done
CaptureDemo:/> profileCfg 0 77 20 5 80 0 0 40 1 256 6000 0 0 30
Done
CaptureDemo:/> chirpCfg 0 0 0 0 0 0 0 1
Done
CaptureDemo:/> lowPower 0
Done
CaptureDemo:/> frameCfg 0 0 128 1 20 1 0
Done
CaptureDemo:/> sensorStart
Debug: Init Calibration Status = 0x7fe
Done
CaptureDemo:/>
```

Figura 3.17: Exemple de CLI activació radar

3.3 Descodificació arxiu .dat

L'arxiu .dat extret del visualitzador és un arxiu xifrat del tipus TLV (Type Length Value) del qual es pot obtenir la informació necessària per a desxifrar-lo del paquet SDK instal·lat per al funcionament del radar. El directori per a la informació es troba en: *ti/mmWave_SDK_01_02_00_05/packages/ti/demo/xwr16xx/mmwave/docs/doxygen/html/index.html* en l'apartat de *Output Information Sent to Host*. Allà es troba una mera descripció sobre les dades enviades en l'arxiu extret del radar. Aquest arxiu és un conjunt de paquets enviats des del radar. Cada paquet conté una capçalera i un cos.

Per a poder fer el desxifrat de l'arxiu .dat i poder treballar amb les variables resultants, es va decidir realitzar el procés amb el programari de MATLAB. *Texas Instruments* proporciona un codi en el llenguatge de programació *Python* per a poder recollir les dades contingudes en l'arxiu. Aquest codi és anomenat "parseTLV".

El primer que es va fer va ser reconvertir aquest codi a l'entorn MATLAB, és a dir, es va convertir el codi de *Python* a C per a poder treballar amb ell. Aquest codi és el procés de descodificació indicat pel directori d'informació indicat anteriorment.

El codi "parseTLV.m" és una funció que serveix per a accedir a l'arxiu .dat a partir d'uns paràmetres d'entrada i que retorna determinats paràmetres segons la configuració de funcionament del radar. Les dades extretes dels diferents paquets tenen l'indicador a la capçalera.

Per fer ús d'aquesta funció, es fa servir el codi principal "mmwave_read_complete.m", el qual fa ús de les següents funcions:

- "header_read.m": Serveix per agafar les dades de la capçalera.
- "padding_read.m": Serveix per agafar les dades del cos dels paquets.
- "parseTLV.m": Mencionat anteriorment, serveix per a l'extracció dels paràmetres obtinguts pel radar.

El codi "mmwave_read_complete.m" executa els següents passos per a tal de descodificar l'arxiu .dat:

- Configuració de les variables i obertura del fitxer:
 - Definició del número de mostres de l'ADC, el número d'antenes transmissores i receptors, el nombre de *chirps* per cada trama, el número de *bins* de rang i de Doppler.
- Per a la definició d'aquestes variables, s'ha de tenir en compte que quan es posa el radar en marxa des del visualitzador, s'escullen els diferents paràmetres del radar. Els dos grans modes d'actuació són:

* BRR (*Best Range Resolution*), sent la millor mesura per a la resolució en distància, tenint les següents característiques:

- Freqüència: 77 GHz.
- *Slope* del *chirp*: 70 MHz/ μ s.
- Mostres per *chirp*: 256.
- *Chirps* per trama: 32.
- Taxa de mostreig: 5.209 MSPS (*Mega Samples per Second*).
- Ample de banda d'escombrat: 3.4402 GHz.
- Període trama: 100 ms.
- Tx: 2.
- Rx: 4.

* BVR (*Best Velocity Resolution*), sent la millor mesura per a la resolució en velocitat, o per a fer les mesures amb l'objectiu d'observar velocitats en objectes. Té les següents característiques:

- Freqüència: 77 GHz.
- *Slope* del *chirp*: 100 MHz/ μ s.
- Mostres per *chirp*: 64.
- *Chirps* per trama: 256.
- Taxa de mostreig: 5.333 MSPS (*Mega Samples per Second*).
- Ample de banda d'escombrat: 1.2001 GHz.
- Període trama: 100 ms.
- Tx: 2.
- Rx: 4.

Com es pot observar en les característiques, com més ràpid es fa l'escalat dels senyals *chirp*, més bona resolució en velocitat s'obté. No obstant, si es té més ample de banda d'escombrat del senyal *chirp*, s'obtindrà una resolució en rang molt millor.

– S'obre l'arxiu i es guarda en la variable *file* i es crea una contrasenya que porta incorporada en el fitxer, per a comprovar si es pot realitzar el desxifrat, sent un arxiu del radar IWR1642Boost.

- Lectura de les capçaleres dels paquets de l'arxiu *.dat* a partir de la crida de la funció "header_read.m". El resultat es retorna a la variable *header*. Aquesta variable conté:

- *magicWord*: És la contrasenya. És un senyal de sincronització de 8 Bytes. Ha de coincidir amb la variable definida.
 - *header(1)* → Versió: És la versió utilitzada del *mmWave* SDK.
 - *header(2)* → *Total Packet Length*: Longitud del paquet (cada capçalera pertany a un paquet).
 - *header(3)* → Plataforma: Quin és el model de placa utilitzat.
 - *header(4)* → Número de trames del paquet.
 - *header(5)* → Temps de la CPU (*CPU Cycle*).
 - *header(6)* → Número d'objectes detectats.
 - *header(7)* → Número d'estructures de dades per paquet.
- A partir del número d'estructures de dades per paquet (*header 7*), es crida a la funció "*parseTLV.m*" enviant la informació sobre el fitxer, el número de blancs detectats, el número de *bins* de rang i de Doppler, i els *chirps* per trama. La funció retorna, segons els *tags* del document, és a dir, segons la configuració dels paràmetres introduïts que es volen del radar, unes mesures o unes altres. Per defecte, retorna les característiques donades pels objectes detectats, el perfil de rang i finalment, les estadístiques (es pot observar en el codi "*parseTLV.m*").

Aquestes crides a les funcions es fan en bucle per a analitzar tots els paquets del document *.dat*. Els resultats, es van guardant successivament en les variables:

- *headerall*: Variable on es guarden les dades de totes les capçaleres dels paquets rebuts en el document.
- *packageall*: Variable on es guarden les dades del cos de tots els paquets rebuts en l'arxiu. Aquest arxiu és el que conté totes les dades corresponents a les mesures realitzades pel radar. Aquestes dades ja han sigut processades pel corresponent DSP de la placa.

3.4 Estructura de dades: *packageall*

La variable *packageall* és on s'emmagatzemen totes les dades sobre les mesures realitzades amb el radar. Aquesta variable és de la forma *cell*. És una estructura de *n* paquets files, i una columna, per tant, *nx1 cell*. Cada una de les files conté un paquet de *m**x**m tags*. Aquests *tags* són els que s'han vist en el codi de "*parseTLV.m*". Per defecte, les etiquetes que es fan servir són la 1, la 2 i la 6. Per aquest motiu, el més normal, és rebre en cada fila de la cel·la *packageall*, un paquet de 3x3. Aquest paquet conté l'estructura mostrada en la taula (3.2).

<i>Tag</i>	<i>Length</i>	<i>Payload</i> (Dades)
1	28	7x1 <i>cell</i>
2	512	1x1 <i>cell</i>
6	24	6x1 <i>cell</i>

Taula 3.2: Estructura $packageall\{n,1\}$

En el *tag* número 1 es pot observar que té una longitud determinada i que en el camp de dades (*payload*), conté una cel·la de dimensions 7x1. Aquesta cel·la conté les següents informacions sobre les mesures del radar:

- *Descriptor*: El descriptor conté dues dades, l'estructura que segueix és [A;B]. A és el número d'objectes detectats per el radar en aquell moment. B és el format Q de les dades x, y i z. El format Q és un format de número de punt fixe on s'especifica el nombre de bits fraccionats (ocasionalment també el nombre de bits enters).
- *Range Index*: Aquesta variable conté els índexs de les *bins* de la graella de la 1-D FFT (FFT en relació al rang). Per a poder transformar el rang dels objectes detectats a un rang en metres, s'ha de multiplicar per la resolució en rang determinada per la *chirp* configurada: $range(m) = range_{Index} * range_{Resolution}$.
- *Doppler Index*: Aquesta variable conté els índexs de les *bins* de la graella de la 2-D FFT (FFT en relació a l'efecte Doppler). Per a transformar els índexs a velocitats, s'ha de multiplicar per la resolució Doppler segons la configuració del senyal *chirp*: $velocity(m/s) = Doppler_{Index} * Doppler_{Resolution}$.
- *Peak Value*: El valor pic correspon al *peak value* de la FFT dels objectes detectats. No té unitats i els objectes amb unes reflexions més grans provocaran valors pic més elevats.
- *X coordinate*: Conté la posició en metres del blanc en l'eix x.
- *Y coordinate*: Conté la posició en metres del blanc en l'eix y.
- *Z coordinate*: Conté la posició en metres del blanc en l'eix z. Aquest radar no conté antenes transmissores en elevació, per tant, aquesta component sempre serà 0.

En el *tag* número 2 es pot observar que té una longitud determinada i que en el camp de dades (*payload*), conté una cel·la de dimensions 1x1. Aquesta cel·la conté un vector de dimensió igual a les mostres per *chirp* posades en la configuració del radar, és a dir, si el radar ha estat configurat de forma BRR s'obtindrà un vector de 256x1, i si el radar ha estat configurat de la

forma BVR, s'obtindrà un vector de 64x1. Aquest vector conté la informació de cada una de les mostres del *Range Profile* en forma logarítmica. Per això, per obtenir les mesures del perfil de rang s'haurà de passar a escala logarítmica els resultats.

Finalment, en el *tag* número 6 es pot observar que té una longitud determinada i que en el camp de dades (*payload*), conté una cel·la de dimensions 6x1. Aquesta cel·la conté les informacions referents a dades de transmissió i procés del radar, són les següents:

- *Interframe Process Time.*
- *Transmit Output Time.*
- *Interframe Process Margin.*
- *Interchip Process Margin.*
- *Active Frame CPU Load.*
- *Interframe CPU Load.*

Capítol 4

Experimentació

En aquest capítol es parlarà sobre algunes de les mesures realitzades amb el radar IWR1642Boost extretes del fitxer *.dat* del visualitzador i processat a partir d'alguns *scripts* realitzats amb MATLAB. També s'exposaran les comprovacions de que el radar funciona correctament, i les mesures que realitza són apropiades.

4.1 Programes per a mesures

Per a poder fer les visualitzacions sobre les mesures realitzades pel radar, es van realitzar diferents programes, per a la visualització de diferents mesures i tractament dels diferents paràmetres rebuts, com podrien ser l'evolució del mapa en dos dimensions sobre els blancs detectats, l'evolució del perfil de rang o l'evolució sobre el mapa de velocitats sobre els blancs.

S'ha de tenir en compte, que els paràmetres dels programes venen donats per la configuració realitzada per a prendre les mesures amb el radar, és a dir, la resolució en rang i la resolució en velocitat, per exemple, ja estan prefixades al utilitzar alguna de les versions d'ús del radar. La majoria de programes, tenen dues versions, una utilitzada per a mesures BRR (*Best Range Resolution*) i l'altra utilitzada per a les mesures BVR (*Best Velocity Resolution*).

Aquests programes s'exposen a continuació:

- "plot_2D.m": Aquest programa fa el mapeig, durant el temps de gravació, dels blancs detectats pel radar, usant els paràmetres de cada una de les coordenades rebudes per a cada blanc del fitxer *.dat*.
- "plot_ContRangeProf_BRR.m" o "plot_ContRangeProf_BVR.m": Aquest programa mostra l'evolució temporal del perfil de rang, fent ús del parametre *Range Profile Log*

i convertint-lo a unitats logarítmiques per a visualitzar la magnitud de la potència rebuda per cada un dels blancs en funció de la distància a la qual es troba.

- "plot_ContRangeIndDopInd_BRR.m" o "plot_ContRangeIndDopInd_BVR.m": Aquest programa mostra l'evolució temporal del mapeig de les velocitats dels blancs respecte a la distància a la qual es troben, fent ús dels paràmetres següents: índexs Doppler i les coordenades.

4.2 Experimentació: laboratori

Per a començar amb els experiments i comprovacions de que es pot treballar amb els diferents paràmetres proporcionats per l'arxiu *.dat* de la placa IWR1642Boost, es van realitzar un conjunt de mesures simples per a la detecció d'objectes immòbils. Al principi es va disposar el radar per a la detecció del sostre i parets, ja que són blancs fàcilment detectables. A partir de les proves del mapeig en dues dimensions, es va poder observar que les mesures realitzades pel sistema, juntament amb els paràmetres que es rebien, eren correctes.

Com s'ha comentat anteriorment, la majoria dels experiments es realitzen tant amb el mètode BRR i BVR. Per a la comprovació de la detecció de grans blancs, a partir del mètode de funcionament de BRR i BVR, es pot observar un empitjorament en la precisió de les mesures, entre ambdues gràfiques, com es podrà observar a continuació.

En les dues primeres imatges, es pot veure el mapeig en dues dimensions tant de la mesura de BRR com de la mesura BVR. També, es podran observar els *Range Profile* d'ambdues proves, on s'observa la major diferència entre ambdues mesures.

Per a observar les diferències, en les mesures del mapeig en dues dimensions, s'ha de tenir en compte l'escenari. El radar es col·loca a una distància aproximada de 2.7 metres respecte a la paret, amb diferents obstacles entre el sistema i l'objectiu. Es pot observar que en la figura (4.1), mesura BRR, la mesura de la distància és més aproximada, tant en la coordenada 'x' com en la 'y', en canvi, en la figura (4.2), mesura BVR, la distància a la qual es detecta la paret és a 2.617 metres i més desviat en l'eix 'x'. En les mesures de les magnituds de les potències reflectides pels blancs mostrejades sobre el perfil de rang (4.3), es poden observar dues diferències principals:

- Encara que la forma que segueix el perfil de rang és aproximada, es pot veure un empitjorament de la precisió de les mesures BVR respecte a les mesures BRR.
- S'observa que la magnitud de la distància màxima de detecció de les dues mesures és diferent. Això és degut a que la mesura BVR empitjora tant la resolució en distància com la distància màxima.

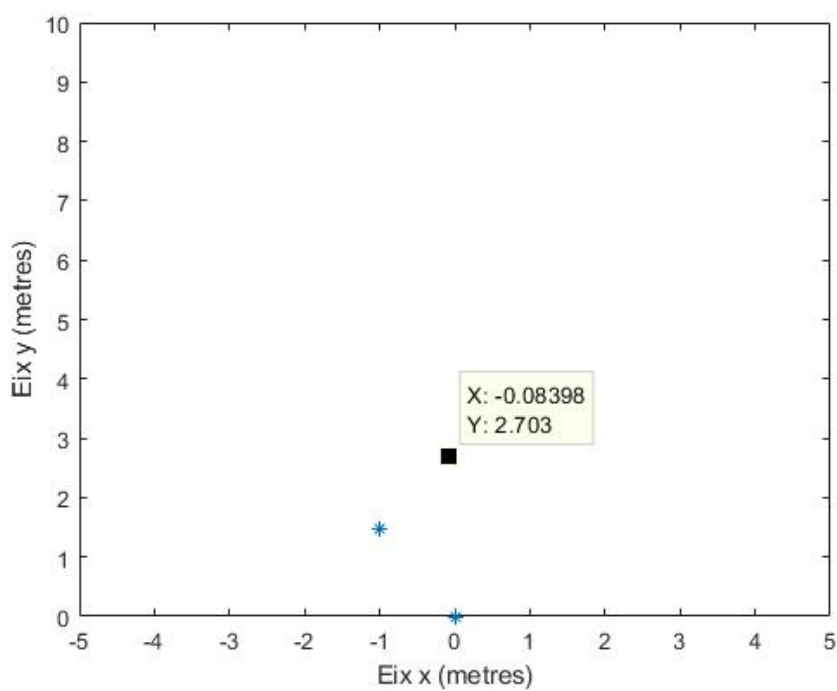


Figura 4.1: Mapeig 2-D blanc BRR

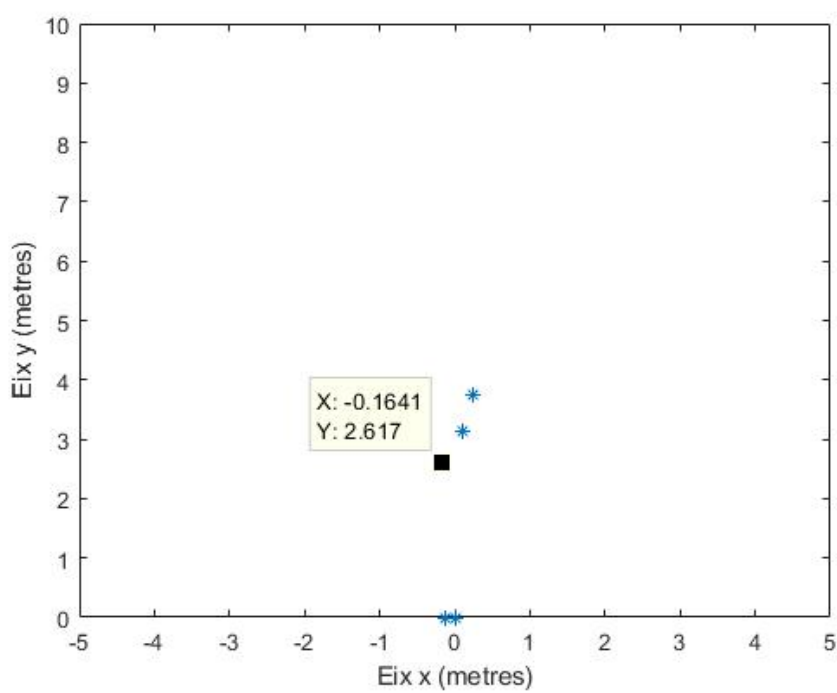


Figura 4.2: Mapeig 2-D blanc BVR

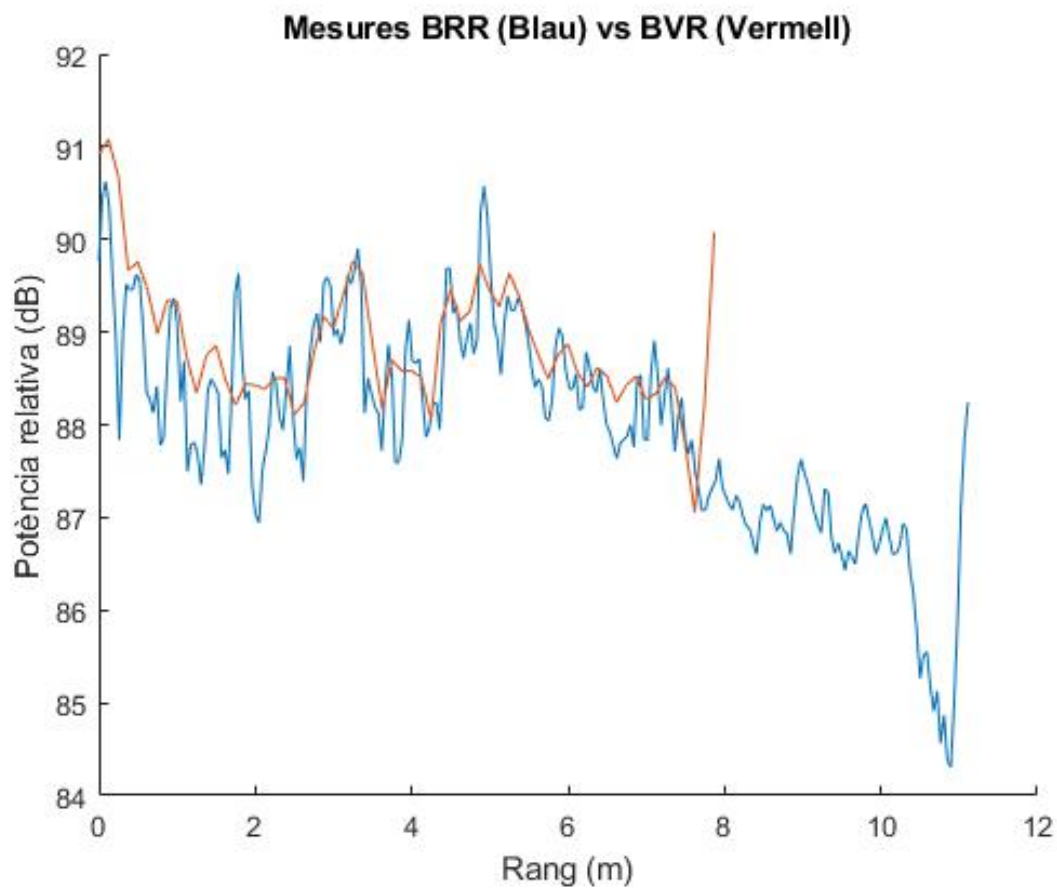


Figura 4.3: Perfil de rang mesura BRR vs BVR

Els diferents paràmetres per a realitzar les mesures es mostren en la taula (4.1).

	BRR	BVR
f_s	5.209 MHz	5.333 MHz
c	$3 \cdot 10^8$ m/s	$3 \cdot 10^8$ m/s
$bins_{range_{num}}$	256	64
$chirp_{slope}$	70 MHz/ μs	100 MHz/ μs

Taula 4.1: Paràmetres mesures

Per a poder realitzar el mapeig del perfil de rang en els eixos X (Distància (m)) i Y (Potència Relativa (dB)), s'havia de convertir l'eix, des de el número de mostres per cada *chirp* fins a la distància en metres. Per a realitzar-ho s'han de seguir diferents passos.

- S'ha de tenir en compte el número de *bins* en rang utilitzats, que en aquest cas, coincideixen amb les mostres de l'ADC per a cada un dels casos, BRR i BVR. S'exposarà en el camp de BRR:

$$- N_{bins} = 0 \dots 255 \text{ (256 bins)}$$

- Tot seguit, s'ha de normalitzar el número de *bins*, continuant tenint el mateix nombre de camps:

$$- N_{binsnorm} = N_{bins} / range_{binsnum}$$

$$- N_{binsnorm} = 0 \dots 1 \text{ (256 bins normalitzats)}$$

- Després, s'agafaran els *bins* normalitzats i es multiplicaran punt per punt per la freqüència de mostreig f_s :

$$- f_{if} = N_{binsnorm} \cdot f_s$$

- Finalment, s'han de convertir les mostres de freqüència intermèdia en distància. Això es realitza de la següent manera:

$$- R = \frac{f_{if} c_o T_{sweep}}{2B}$$

$$- \frac{T_{sweep}}{2B} = \frac{1}{chirp_{slope}} \rightarrow R = \frac{f_{if} c_o}{2chirp_{slope}}$$

- Un cop s'hagi aconseguit l'eix en distància ja es pot fer el mapeig del perfil de rang.

$$- plot(R(:, range_prof(:)))$$

Com s'observa, les dues gràfiques que mostren el perfil de rang, tenen una gran diferència de resolució. Això és a causa de que quan es treballa amb el mètode de *Best Range Resolution* cada senyal *chirp* conté un total de 256 mostres, en canvi, amb el mètode de *Best Velocity Resolution*, cada *chirp* conté un total de només 64 mostres. Això explica que hi hagi molta menys resolució en el segon cas.

Això, però, té un efecte contrari en la mesura de la velocitat, on el segon cas és molt més resolutiu. Aquest cas s'explica perquè per guanyar resolució en velocitat s'ha de reduir el temps de *chirp*. Això es pot observar en que el mètode BRR conté 32 *chirps* per cada trama, en canvi, el mètode BVR conté 256 *chirps* per cada trama. Tenint en compte que el temps de trama és

el mateix en els dos casos, $100ms$, en el cas de BVR, el temps de *chirp* és molt més petit, degut a que el *slope chirp* és molt més elevat.

El següent pas seguit per a veure les operacions del radar, va ser prendre mesures amb els dos mètodes, BRR i BVR, d'una persona asseguda en una cadira amb rodes movent-se respecte del radar. El radar, situat en una superfície plana a una elevació de mig metre aproximadament, mesurava de manera exacte el recorregut seguit per la persona, que seguia un recorregut recte des d'uns 30 cm del radar fins a 3 m aproximadament, aquests experiments es poden observar en les mesures *.dat* següents:

- "BRR_15_05_2019-9_39-Cadira.dat".
- "BVR_15_05_2019-9_41-Cadira.dat".

Després, es van realitzar les dues mesures corresponents a una persona caminant per la sala del laboratori. El radar, situat a sobre d'una taula a una elevació de mig metre, la persona seguia un recorregut quasi recte, des d'una distància d'uns 30 cm del radar fins a una distància de 4-4.5 metres. Per a realitzar aquesta mesura, el RCS, que actua com a llindar (*threshold*) per a agafar els objectes més convenients per a les mesures, es va reduir a la meitat, cosa que afecta a la distància màxima de detecció, però millora la resolució: $RCS = 0.5 m^2$. Això es pot observar en les mesures *.dat* següents:

- "BRR_15_05_2019-10_36-Caminar-RCS0.1.dat".
- "BVR_15_05_2019-10_38-Caminar-RCS0.1.dat".

Per a continuar amb les mesures, es va utilitzar un tetraedre, que s'exposarà en la següent secció.

4.2.1 Mapeig en 2-D (X,Y)

Per a fer el mapeig en dues dimensions, sobre l'eix d'abscisses (x) i l'eix d'ordenades (y), s'ha de tenir en compte la secció 3.4. Per a poder obtenir les dades referents a les coordenades s'ha d'accedir a les cel·les dels diferents paquets i per als diferents blancs. Per això, es recorreran els diferents paquets de l'arxiu, i s'aniran extraient les diferents posicions en l'espai per a cada blanc. Això es realitzarà creant dues matrius, una per la posició X i l'altra per la posició Y, en que cada fila és un paquet de l'arxiu, i les columnes pertanyen a cada un dels blancs de cada paquet.

Per a recórrer les diferents posicions de l'arxiu es realitza:

- $z \rightarrow 1$ a Número de paquets.
- $i \rightarrow 1$ a Número de blans per cada paquet.
- Posició X: $x(z, i) = \text{packageall}\{z, 1\}\{1, 3\}\{5, 1\}(1, i)$.
- Posició Y: $y(z, i) = \text{packageall}\{z, 1\}\{1, 3\}\{6, 1\}(1, i)$.

Un cop s'han creat les matrius de les pertinents posicions x i y , es passa a fer el mostreig durant el temps de les posicions dels blans, per això es realitza un procés per temps:

- `plot(x(z,:),y(z,:), '*')`
- `xlabel('Eix x (m)'), ylabel('Eix y (m)')`
- `axis([-5 5 0 10])`
- `pause(0.05)`
- Es defineixen els eixos degut a que només ens interessen les mesures realitzades per a blans dins de les mesures possibles del laboratori.

4.2.2 Perfil de rang i resolució en distància

Per a realitzar les mesures de rang, s'ha de tenir en compte, com a la secció anterior, les dades de l'arxiu mostrades en 3.4. Per a poder mostrar el perfil de rang de les mesures, s'ha de tenir en compte el canvi d'eix d'abscisses mostrat en 4.2.

Per agafar les mesures de perfil de rang, que equivalen als 256 *bins* de cada *chirp* i mostrejant-les, s'ha de recórrer cada un dels paquets de l'arxiu obtingut, a partir de:

- $g = \text{packageall}\{j, 1\}\{2, 3\}\{1, 1\}$
- $g = 20 \log_{10}(g)$
- `plot(R, g)`
- `xlabel('Range (m)'), ylabel('Relative Power (dB)')`
- `pause(0.05)`

El número de *bins* per la FFT en rang per a cada un dels paquets, com s'ha mencionat anteriorment, és de 256. Cada un d'aquests *bins* conté una resolució en distància corresponent a $\Delta R = 0.0436m$ per a mesures amb BRR, per a mesures amb BVR té una resolució corresponent a $\Delta R = 0.125m$.

4.2.3 Velocitat i resolució en velocitat

Les mesures de velocitats, venen donades per l'índex de l'efecte Doppler. Les mesures realitzades en l'arxiu *.dat*, contenen els valors dels índexs dels *bins* relatius a la 2-D FFT, és a dir, a la FFT Doppler. Per a convertir en velocitat, com s'ha mencionat en la secció 3.4, s'ha de multiplicar per la resolució Doppler.

S'ha de tenir en compte que el número de *bins* Doppler és de 65536 posicions, des de la 0 a la 65535. Els diferents *bins* representen les parts positives i negatives de les velocitats. Des de l'índex *bin* 0 fins al 32767 corresponen a l'espectre de velocitats positives, i des del 32768 al 65535 corresponen a l'espectre de velocitats negatives.

L'extracció dels diferents índex dels *bins* Doppler s'ha realitzat de la següent manera:

- S'han de recórrer tots els paquets (i), com els diferents blancs detectats per cada paquet (j).
- $RangeInd(i, j) = packageall\{i, 1\}\{1, 3\}\{2, 1\}(1, j)$
- $DopplerInd(i, j) = packageall\{i, 1\}\{1, 3\}\{3, 1\}(1, j)$
- if $DopplerInd(i, j) \geq \frac{bins_{Doppler_num}}{2}$
 - {
 - $DopplerInd(i, j) = DopplerInd(i, j) - conta$
 - $DopplerInd(i, j) = DopplerInd(i, j) * Vel_{Res}$
 - $RangeInd(i, j) = RangeInd(i, j) * Range_{Res}$
 - }
 - else
 - {
 - $DopplerInd(i, j) = Vel_{Res} * DopplerInd(i, j)$
 - $RangeInd(i, j) = RangeInd(i, j) * Range_{Res}$
 - }
- `plot(RangeInd(i,:), DopplerInd(i,:), '*')`
- `ylabel('Velocity (m/s)'); xlabel('Range (m)');`
- `axis([0 10 -4 4])`
- `pause(0.05)`

4.3 Reflector tetraedre

El reflector tetraedre ha sigut, des de fa molt temps, el reflector més utilitzat per a la calibració de radars. Aquests receptors cònics aporten uns atributs desitjables per al calibratge del sistema, com s'exposa en [Bro09]:

- Ampli feix d'arribada d'angles, amb un aspecte de gran RCS.
- RCS teòric calculat fàcilment.
- L'arribada de les ones electromagnètiques té la mateixa direcció que la tornada, i això fa fàcil el seu seguiment i manipulació. Per això, el reflector produeix un gran senyal "eco".

Aquest tipus de reflector, varia de forma segons l'aplicació, com per exemple per als vaixells (detecció marítima) o per a les aeronaus (detecció aèria).

El reflector usat es caracteritza per tenir una cantonada d'on surten tres cares triangulars iguals. El reflector s'exposa en la figura (4.4) i és l'usat en [Men18].

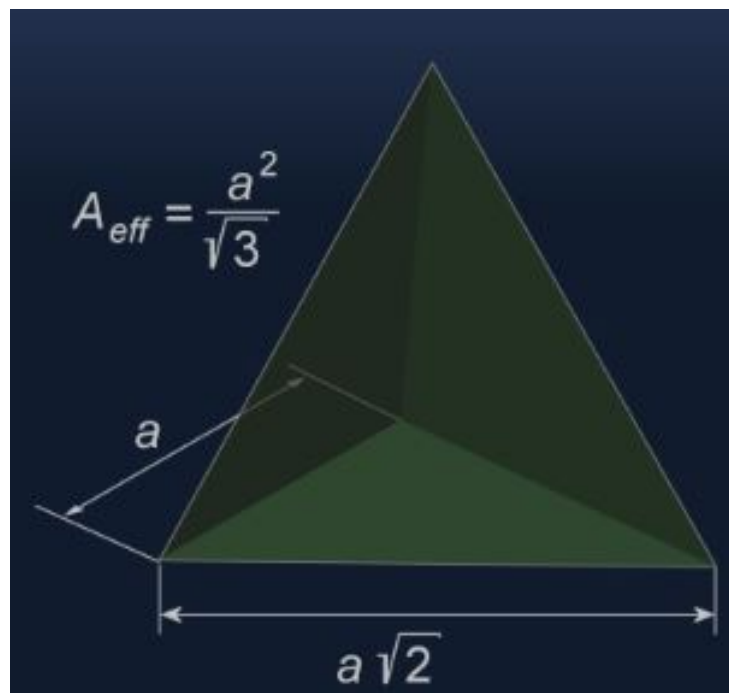


Figura 4.4: Reflector Tetraedre

La longitud dels costats interns dels triangles és a , per aquest motiu, la longitud dels costats externs és de $a\sqrt{2}$. La longitud exacte és de $a = 77.2mm$. Per a saber la RCS a 77 GHz s'utilitza el *CADFEKO* i *POSTFEKO* per a realitzar la comprovació. L'escenari es pot observar en la següent figura (4.5), igual que la RCS biestàtica entre 74 i 81 GHz (4.6). L'evolució de la RCS a partir del reflector tetraedre en les bandes freqüencials s'exposa en [Pra18].

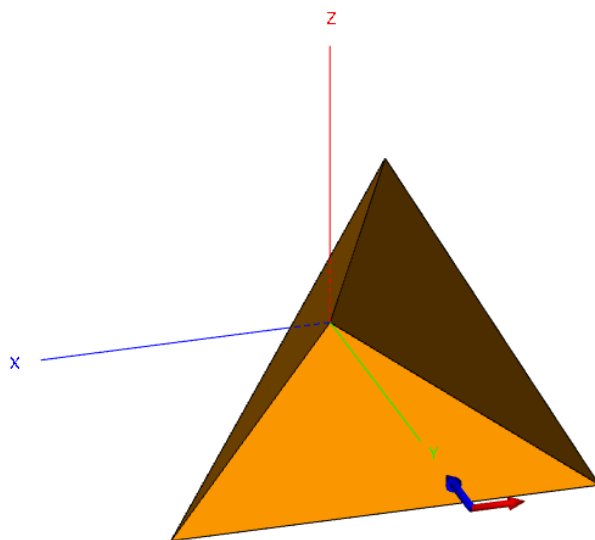


Figura 4.5: Escenari càlcul RCS

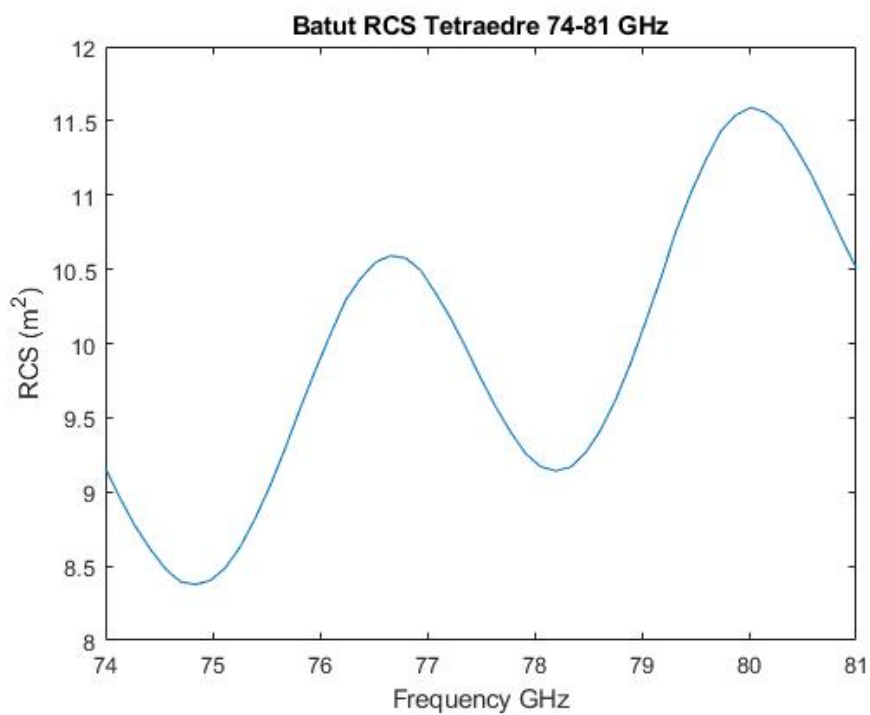


Figura 4.6: RCS experimental en escenari (4.6)

Com es pot comprovar, la RCS es pot calcular com s'observa en l'equació següent (4.1), i es veu que és aproximada a la experimental.

$$\sigma = \frac{4\pi l^4}{3\lambda_o^2} = \frac{4\pi(77 \cdot 10^{-3})^4}{3 \cdot (\frac{3 \cdot 10^8}{77 \cdot 10^9})^2} = 9.8016m^2(9.913dB) \quad (4.1)$$

Després de realitzar tot el procés, es conclou que el reflector tetraedre té una RCS aproximada de $10m^2$.

El reflector està construït amb alumini sòlid. El muntatge es podrà observar en la següent secció, en la figura (4.13).

Les primeres mesures realitzades amb el reflector tetraedre van ser al laboratori. L'escenari és el següent:

- Radar situat sobre superfície plana a 80 – 90cm d'altura.
- Tetraedre situat sobre superfície plana a la mateixa altura que el radar.
- Mètode de funcionament del radar: BRR amb RCS de $10m^2$.
- La distància radar-reflector és de 2.5m.
- 10 segons de gravació $\rightarrow n_{frames} = \frac{10s}{100 \cdot 10^{-3}} + 1 = 101frames$
- "BRR_20_05-9_29-Tetraedre1.dat".

Els resultats dels experiments es poden observar en les següents figures (4.7) i (4.8), on es mostra el mapeig en dues dimensions i el perfil de rang.

El segon experiment realitzat en el laboratori és molt semblant, i l'escenari és el següent:

- Radar situat sobre superfície plana a 80 – 90cm d'altura.
- Tetraedre situat sobre superfície plana a la mateixa altura que el radar.
- Mètode de funcionament del radar: BRR amb RCS de $10m^2$.
- La distància radar-reflector és de 1.6m.
- 10 segons de gravació $\rightarrow n_{frames} = \frac{10s}{100 \cdot 10^{-3}} + 1 = 101frames$
- "BRR_20_05-9_41-Tetraedre2.dat".

Els resultats es mostren en (4.9) i (4.10). En aquest experiment es pot observar que el radar detecta la paret del darrera del radar, situada a 3m aproximadament, en canvi, en el primer experiment no.

També, es pot observar en el perfil de rang, que la RCS usada per a la detecció és correcta, ja que el blanc detectat amb més potència reflectida és el reflector tetraedre.

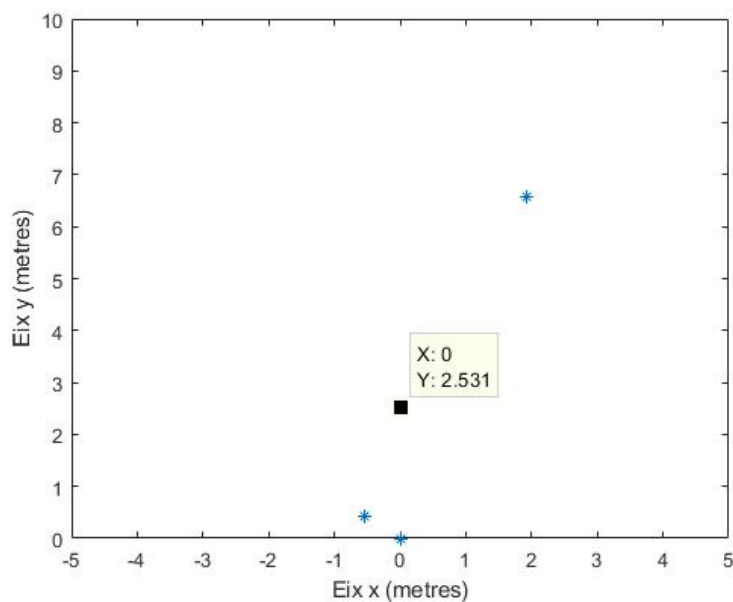


Figura 4.7: Mapeig en 2-D escenari reflector tetraedre

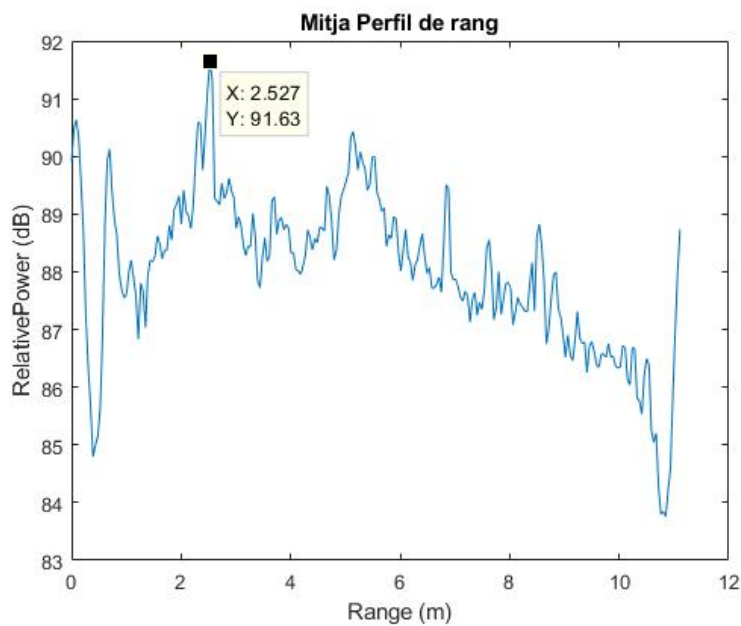


Figura 4.8: Perfil de rang escenari reflector tetraedre

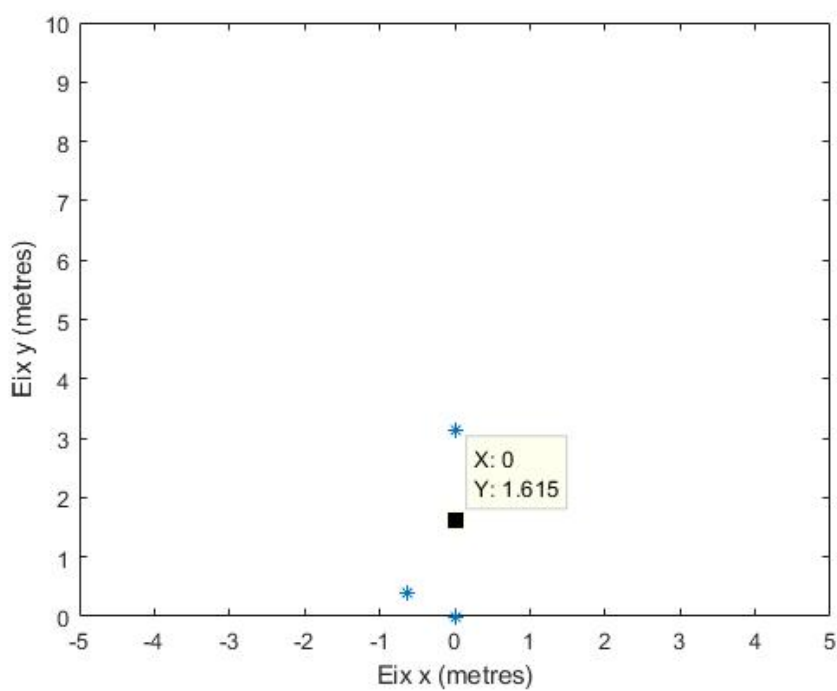


Figura 4.9: Mapeig en 2-D segon escenari reflector tetraedre

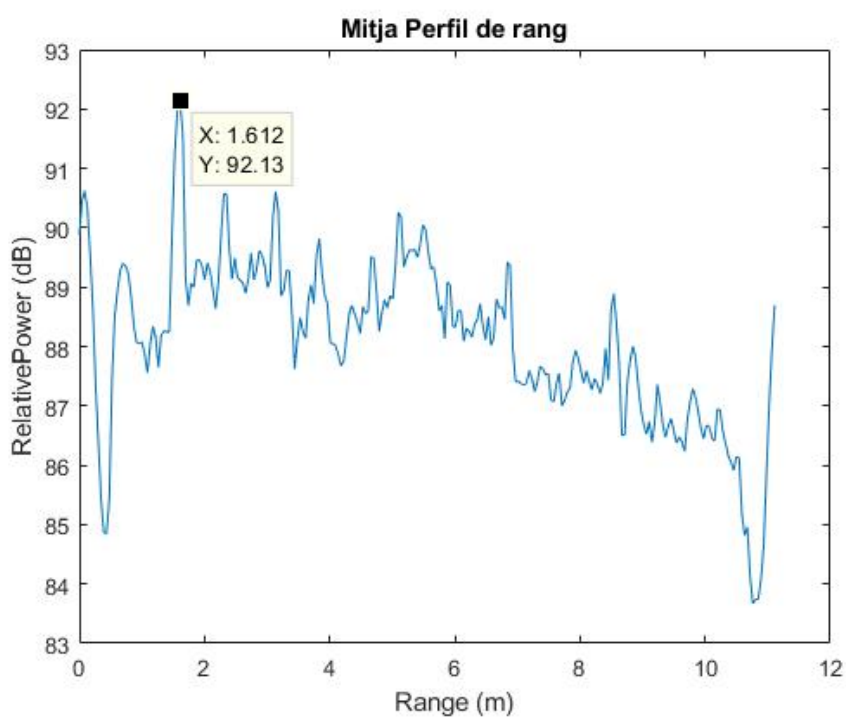


Figura 4.10: Perfil de rang segon escenari reflector tetraedre

4.4 Experimentació: cambra anecoica

El següent pas, després de veure els experiments de detecció de blanc, és fer experiments on les reflexions siguin les mínimes i es pugui detectar de forma correcta el reflector tetraedre. El medi on es treballarà serà la cambra anecoica electromagnètica del departament de Sistemes de Telecomunicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona. Aquesta cambra proporciona una alta absorció, i un aïllament per les freqüències RF.

En la cambra es troben dos pedestals que es poden monitoritzar des de fora d'aquesta. El primer, el DUT (*Device Under Test*), pot rotar en angle azimut i en l'orientació polar. El segon pedestal, només pot girar en orientació polar. En el primer pedestal es col·loca el sistema radar, el qual es podrà anar girant en azimut, per a poder observar, per exemple, quin és l'angle de visió pràctic. En el segon pedestal es col·loca el reflector tetraedre.

Per a la col·locació dels dispositius, es necessiten diferents coses. Per a ambdós, es necessitarà una placa PVC per a poder subjectar els sistemes als pedestals. El reflector tetraedre es munta sobre una estructura mostrada en la figura (4.12).

Per a fer els experiments s'ha de tenir en compte el següent escenari:

- El radar i el reflector estan situats a la mateixa altura aproximadament.
- La distància entre ambdós sistemes és de 2.5 metres.
- La RCS desitjada per a les mesures és de $10m^2$.



Figura 4.11: Muntatge radar en cambra anecoica

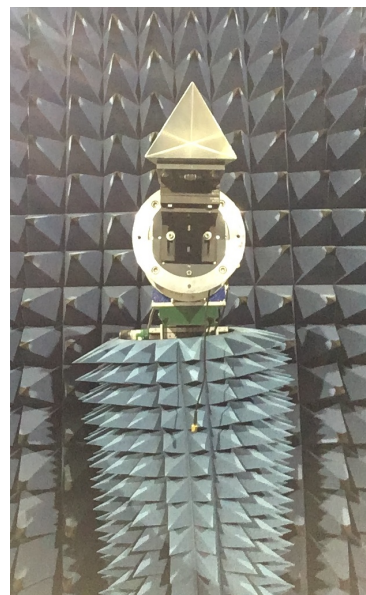


Figura 4.12: Muntatge reflector tetraedre en cambra anecoica

L'escenari de la cambra anecoica es pot observar en les figures (4.13).



(a) Pedestal: radar



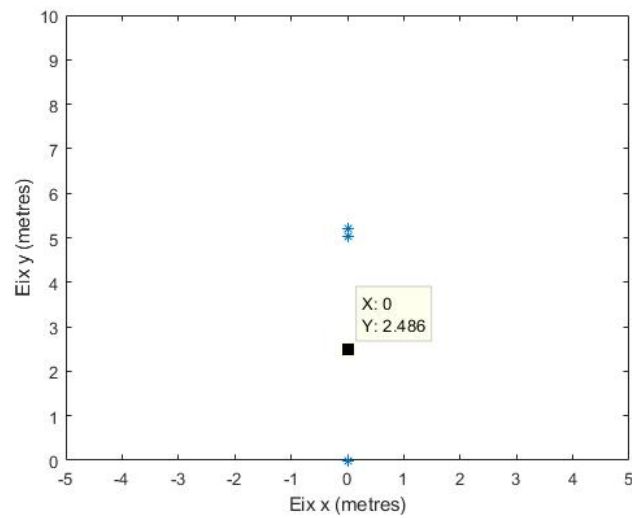
(b) Pedestal: reflector

Figura 4.13: Escenari cambra anecoica

Tot seguit, es van realitzar diferents experiments per a veure la millor detecció del reflector tetraedre. Es van realitzar un total de nou experiments: un experiment de BVR i vuit experiments de BRR. Els sis primers experiments s'expliquen a continuació, juntament amb els resultats obtinguts sobre el mapeig en dues dimensions, el perfil de rang i el diagrama de radiació a partir del tetraedre:

Experiment 1: Mesura radar-tetraedre.

- Detecció reflector tetraedre.
- "BRR_21_05-10_28-CA1.dat".
- 10s de gravació $\rightarrow \frac{10s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 101 frames$



(a) Mapeig en 2-D

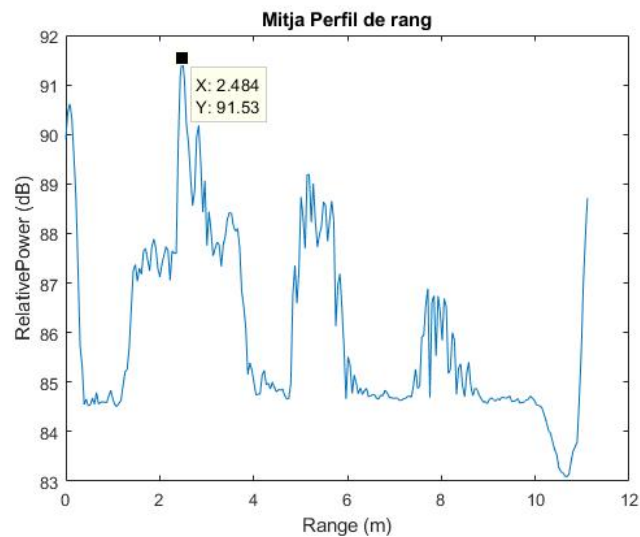
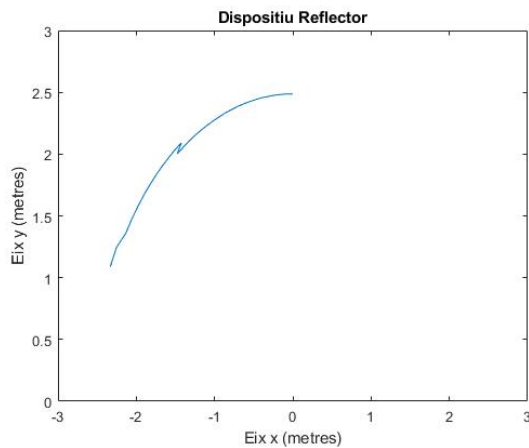
(b) *Average* del perfil de rang

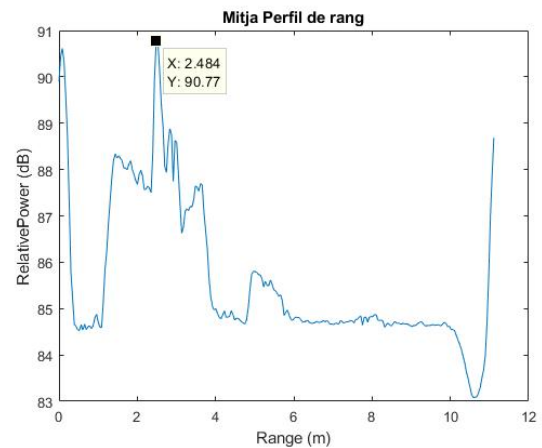
Figura 4.14: Resultats de l'experiment 1

Experiment 2: Mesura radar-tetraedre.

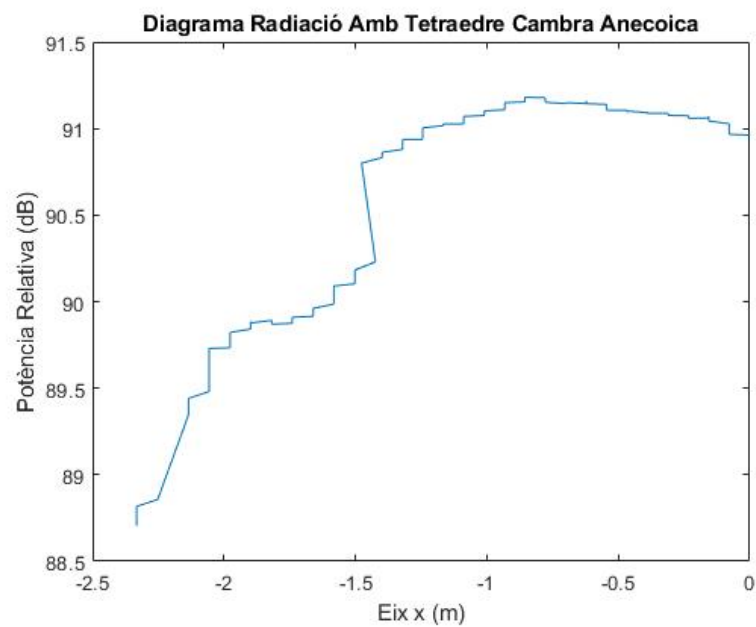
- Rotació en azimuth radar 0° a 60° a 30% de velocitat.
- "BRR_21_05-10_34-CA2.dat".
- 20s de gravació $\rightarrow \frac{20s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 201frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang

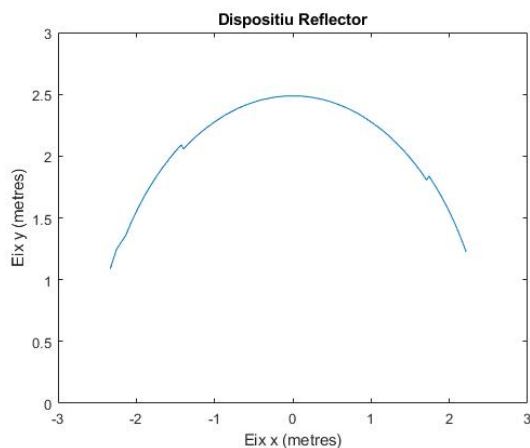


(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

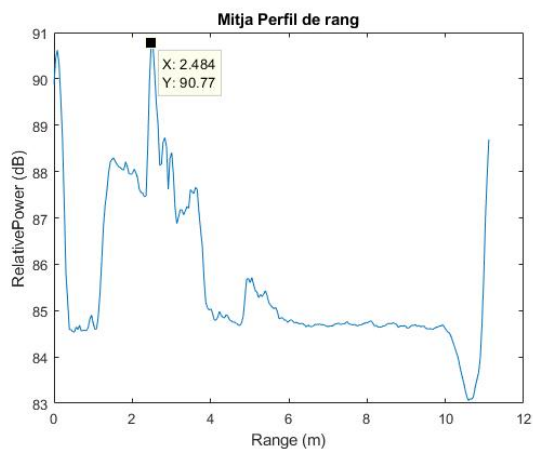
Figura 4.15: Resultats de l'experiment 2

Experiment 3: Mesura radar-tetraedre.

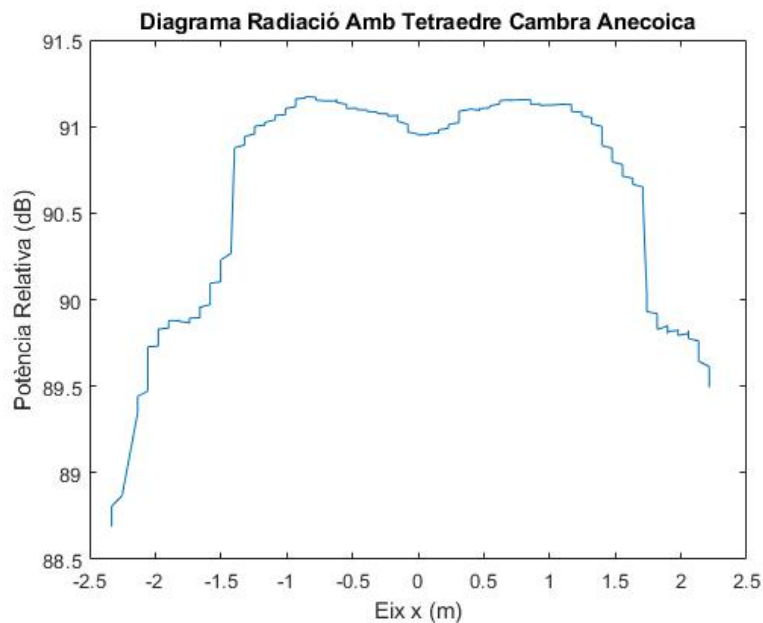
- Rotació en azimuth radar -60° a 60° a 30% de velocitat.
- "BRR_21-05-10-38-CA3.dat".
- 40s de gravació $\rightarrow \frac{40s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 401 frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang

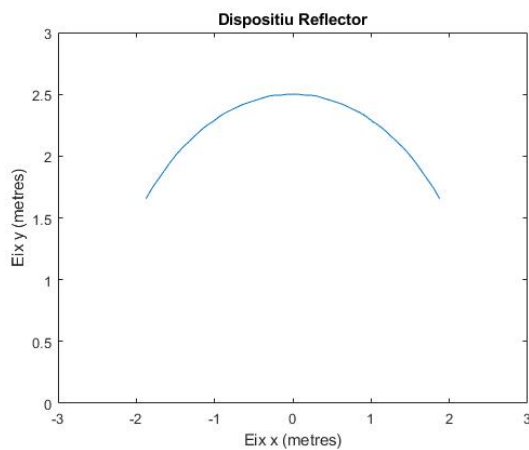


(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

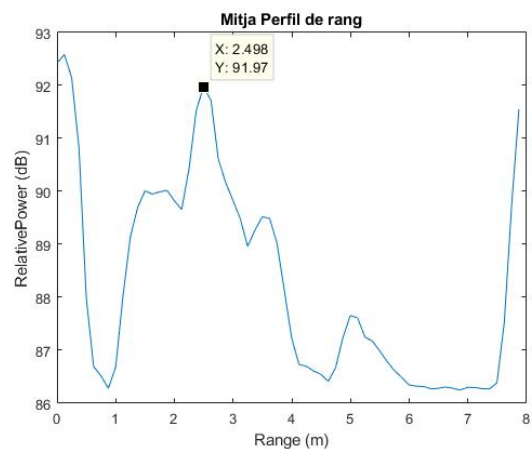
Figura 4.16: Resultats de l'experiment 3

Experiment 4: Mesura radar-tetraedre.

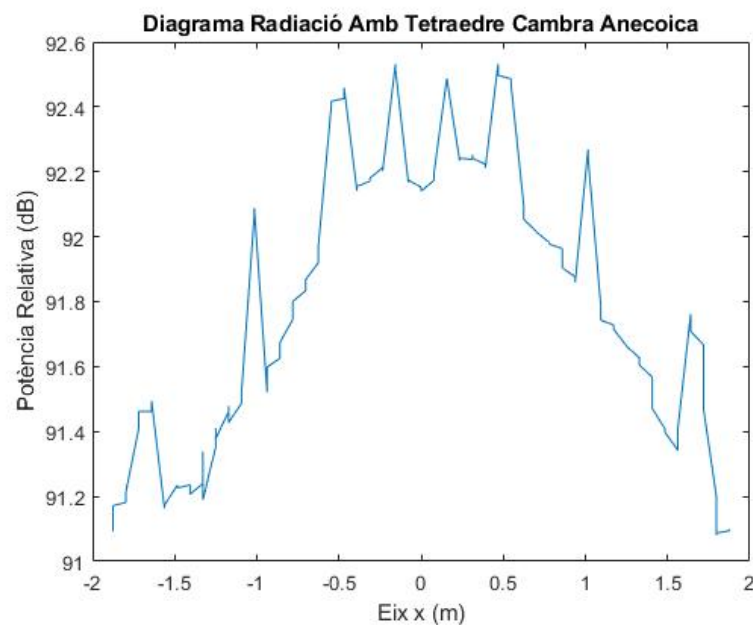
- Rotació en azimuth radar -50° a 50° a 70% de velocitat.
- BVR (*Best Range Resolution*).
- "BVR_21_05-10_44-CA4.dat".
- 20s de gravació $\rightarrow \frac{20s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 201 frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang

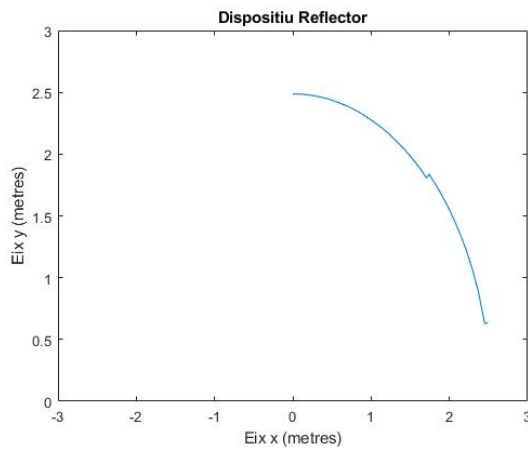


(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

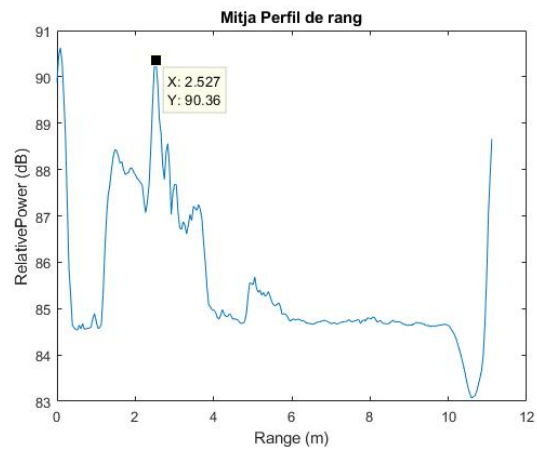
Figura 4.17: Resultats de l'experiment 4

Experiment 5: Mesura radar-tetraedre.

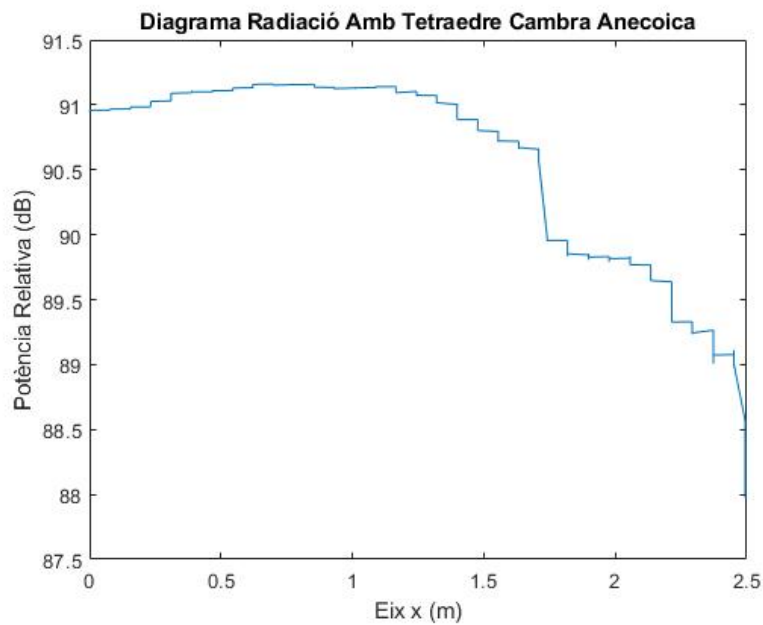
- Rotació en azimuth radar 0° a -90° a 10% de velocitat.
- "BRR_21-05-10-58-CA5.dat".
- 80s de gravació $\rightarrow \frac{80s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 801 frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang

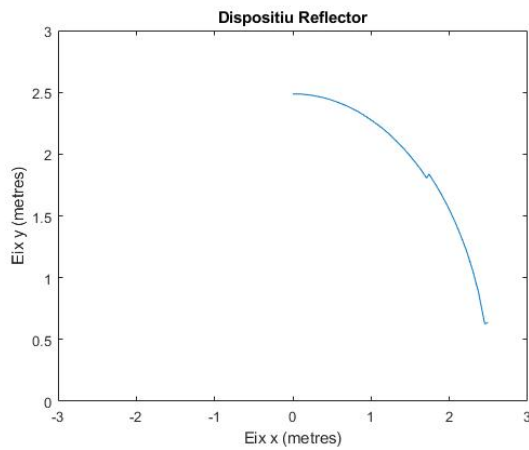


(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

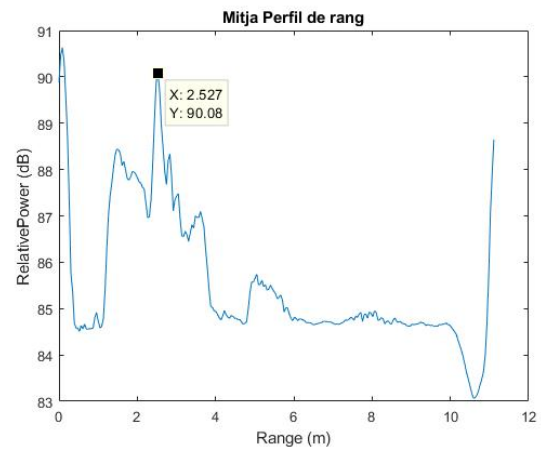
Figura 4.18: Resultats de l'experiment 5

Experiment 6: Mesura radar-tetraedre.

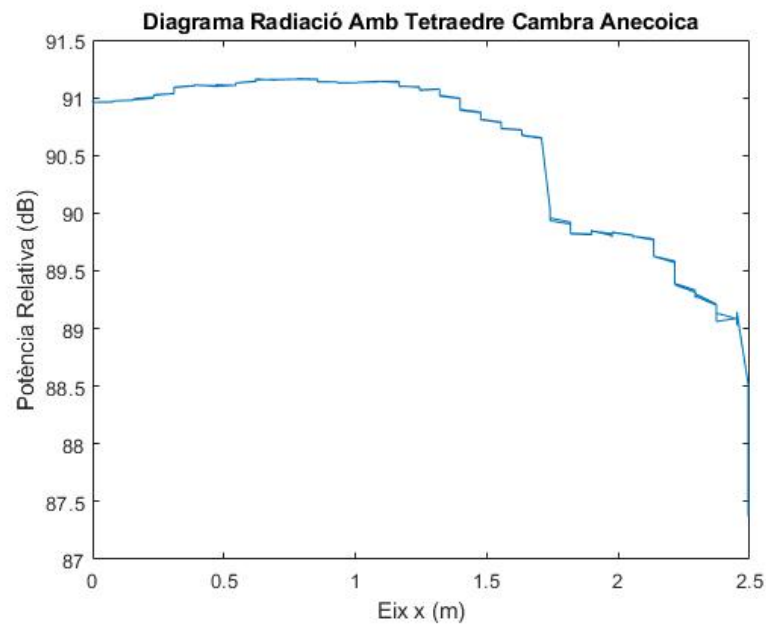
- Rotació en azimuth radar -90° a 0° i de 0° a -90° a 40% de velocitat.
- "BRR_21_05-11_10-CA6.dat".
- 50s de gravació $\rightarrow \frac{50s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 501frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang



(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

Figura 4.19: Resultats de l'experiment 6

Per a poder realitzar els experiments mostrats anteriorment, es necessiten els codis mostrats a continuació:

- "*plot2D_CambraAnecoica.m*": Aquest *script* agafa només la detecció del reflector tetraedre, no té en compte els blancs causats per petites imperfeccions en la cambra anecoica, a causa de petites reflexions en els cantons de la cambra, que no estan ben aïllats pels materials. Per això s'han de posar condicions de distància entre el blanc i el radar. Fa un mapeig de les posicions on detecta el blanc en tot l'experiment.
- "*plot_ContRangeProf_BRR*" o "*plot_ContRangeProf_BVR*": Aquest *script* fa el mapeig durant el temps de l'experiment del perfil de rang del radar. Finalment, fa una mitja entre el perfil de rang del radar i la mostreja (*average Range Profile*).
- "*plot_DiagrRadiTetraCA_EixX_BRR*" o "*plot_DiagrRadiTetraCA_EixX_BVR*": Aquest *script* consisteix en fer el mapeig del diagrama de radiació del radar obtingut a partir del reflector tetraedre amb una RCS desitjada de $10m^2$. Per a poder fer-ho s'han de tenir en compte diferents factors; la distància ha de concordar amb la del reflector en tot moment, s'ha de relacionar el blanc detectat a una distància X amb la potència rebuda en el perfil de rang a la mateixa distància X.

És important observar la diferència de resolució entre els dos mètodes, BRR (experiment 1, 2, 3, 5, 6) i BVR (experiment 4), sobretot en els gràfics de la mitja de perfil de rang i el diagrama de radiació fet a partir del reflector tetraedre.

La velocitat a la que es mou el pedestal es mostra en la següent equació (4.2).

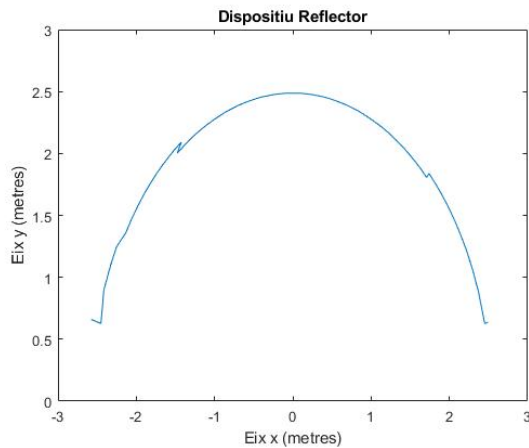
$$v_{pedestal} \approx \frac{angle_{obs}}{t_{obs}} \quad (4.2)$$

Un exemple és l'experiment 3, on el pedestal es mou des de 60° a -60° a una velocitat del 30%, durant 40 segons.

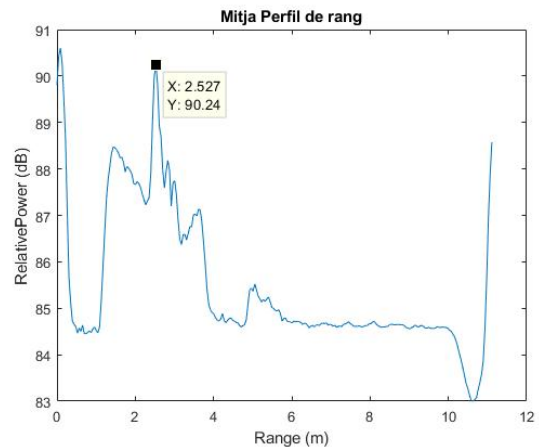
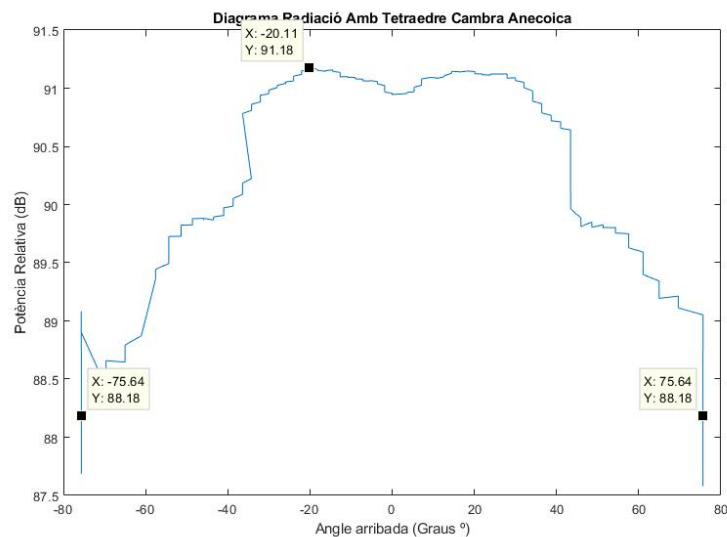
$$v_{pedestal} \approx \frac{60^\circ - (-60^\circ)}{40s} \approx \frac{120^\circ}{40s} \approx 3^\circ/s \quad (4.3)$$

4.4.1 Angle d'arribada (AoA)

En aquesta secció es parlarà sobre una de les mesures fetes a la cambra anecoica. En aquesta mesura, el pilar que subjecta al sistema radar, farà un recorregut -90° a 90° per tal d'observar el camp de visió en la pràctica del sistema radar, juntament amb el diagrama de radiació determinat pel camp de visió del radar, per això, es realitza amb l'escenari que es veu tot seguit, i també els diferents resultats obtinguts:



(a) Mapeig en 2-D

(b) *Average* del perfil de rang

(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

Figura 4.20: Resultats de l'experiment 7

Experiment 7: Mesura radar-tetraedre.

- Rotació en azimuth radar -90° a 90° a 40% de velocitat.
- "BRR_23_05-9_45-CA7.dat".
- 40s de gravació $\rightarrow \frac{40s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 401 frames$
- Velocitat de rotació: $v_{pedestal} = \frac{180^\circ}{40s} = 4.5^\circ/s$

Com es pot observar, el camp de visió total del radar va des de -75.64° a $+75.64^\circ$, encara que a partir d'aquest angle la resolució baixa en picat. La potència relativa que es rep al radar cau uns $3dB$ respecte al màxim a aquests graus d'observació.

4.4.2 Mesures: material d'absorció

Per a finalitzar els experiments, es va decidir realitzar dues mesures més a la cambra anecoica. Aquestes dues mesures consisteixen en realitzar un batut ample tenint un material absorbent situat entre el radar i el reflector tetraedre. Això atenua el senyal rebut, i, així, el camp de visió del radar hauria de minvar.

L'escenari de les mesures consisteix en col·locar un material absorbent al davant del tetraedre com s'observa en la figura (4.21). En el primer experiment el material absorbent s'enganxa al reflector tetraedre a partir de cinta adhesiva. En el segon experiment el material absorbent s'enganxa al reflector a partir de dues gomes de pollastre. Els resultats es mostren a continuació.

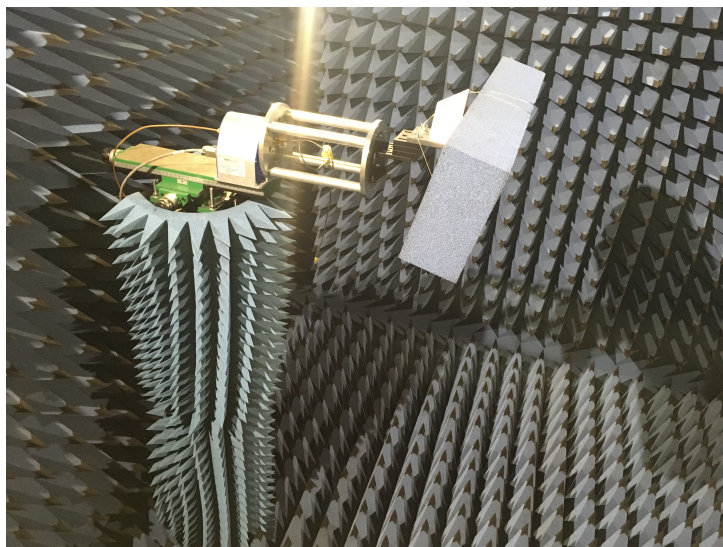
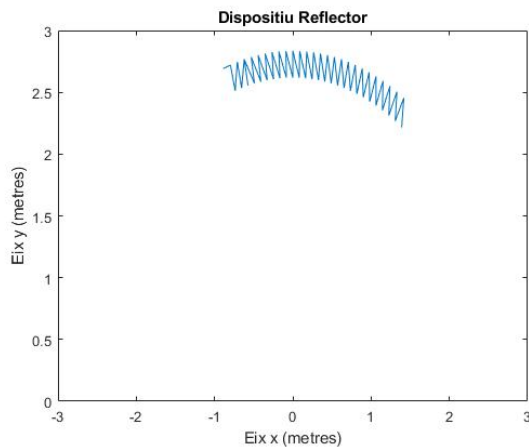


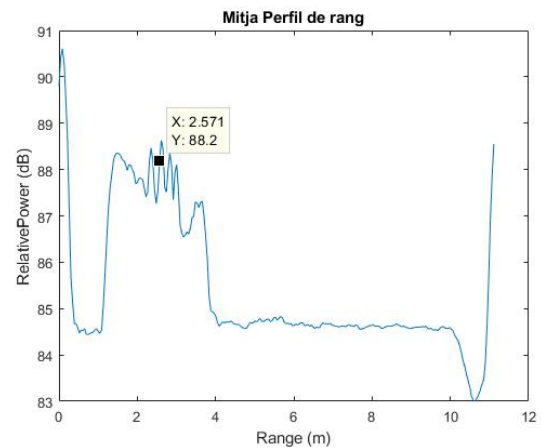
Figura 4.21: Escenari material absorbent

Experiment 8: Mesura radar-tetraedre amb material absorbent enganxat amb cinta.

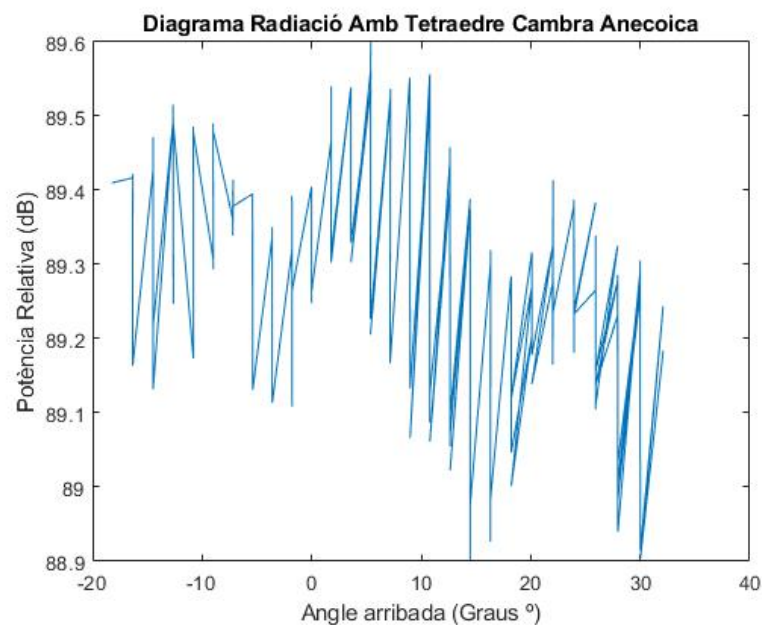
- Rotació en azimuth radar $+80^\circ$ a -80° a 40% de velocitat.
- "BRR_23_05-10-10-CA8.dat".
- 35s de gravació $\rightarrow \frac{35s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 351frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang

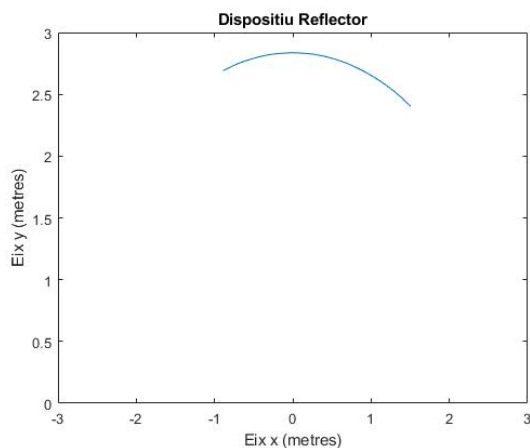


(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

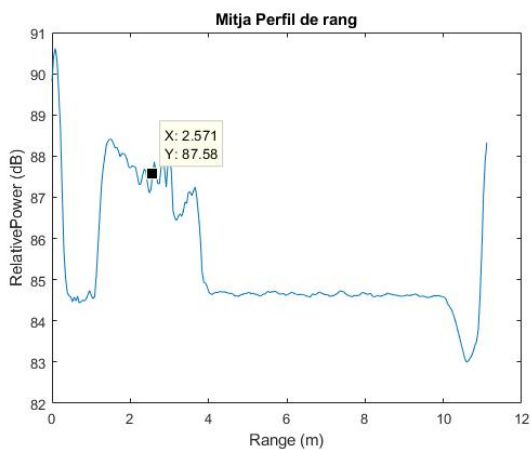
Figura 4.22: Resultats de l'experiment 8

Experiment 9: Mesura radar-tetraedre amb material absorbent enganxat amb dues gomes.

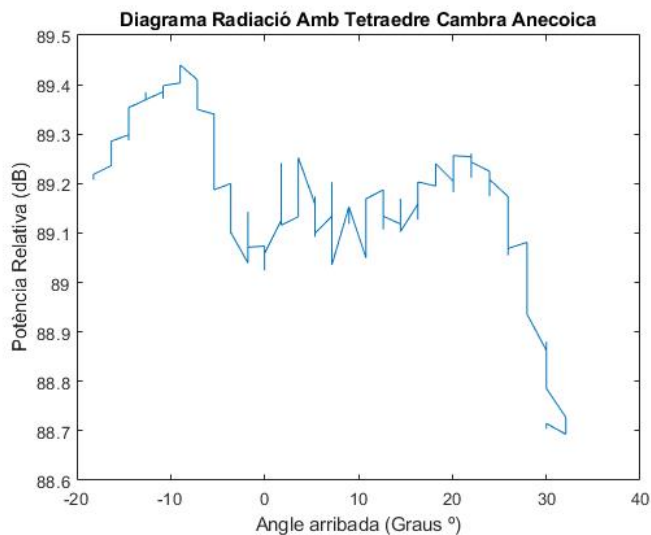
- Rotació en azimuth radar -80° a $+80^\circ$ a 40% de velocitat.
- "BRR_23_05-10_50-CA9.dat".
- 50s de gravació $\rightarrow \frac{5/0s}{100 \cdot 10^{-3}s} + 1 = 501 frames$



(a) Mapeig en 2-D



(b) Average del perfil de rang



(c) Mapeig diagrama radiació segons reflector

Figura 4.23: Resultats de l'experiment 9

Com es pot observar, en el primer experiment es veu molta més oscil·lació, això és degut a que quan s'enganxa el material absorbent al reflector tetraedre amb la cinta adhesiva, hi ha molt més material al voltant que si s'enganxa a partir de dues gomes de pollastre, això causa més canvis en la potència relativa. El segon experiment fluctua de manera menys abrupta. Les mesures realitzades són aproximadament les mateixes tret de les atenuacions causades per com s'enganxa el material.

Es pot observar que la potència mitja d'arribada decau uns 3 dB a causa del material absorbent en ambdues mesures. A la vegada, també es pot observar, en el diagrama de radiació, que el camp de visió del radar disminueix de manera dràstica, arribant a cobrir d'uns -20° a 30° aproximadament com es pot observar en les gràfiques anteriors. Aquesta disminució és causada perquè la potència relativa dels blancs, al disminuir dràsticament, no supera el llindar de detecció del sistema radar, i això causa que no es detecti l'objectiu en determinades posicions.

Capítol 5

Conclusions

La necessitat d'augment en la seguretat dels vehicles en els darrers anys, ha portat a la implementació i millora dels sistemes radars. Aquests sistemes, en l'àmbit de l'automoció, han estat en constant progrés des de finals dels anys 70. L'interès en l'ús d'aquests sistemes recau en que no es requereixen condicions favorables per a la detecció de blancs o objectius, al contrari del que necessita la visió de l'ésser humà.

Els radars per a automòbil, anteriorment, com la major part dels sistemes tecnològics, no estaven a l'abast de tothom ja que eren sistemes innovadors i cars. Actualment, amb l'increment de la demanda i la millora tecnològica, aquests sistemes han passat a ser accessibles. Gràcies a campanyes preses per institucions governamentals com la de *Objective: 0 fatalities*, els sistemes radar han tingut i tenen un gran impuls i avanç.

L'objectiu principal d'aquest projecte era entrar amb més detall en el camp dels radar per a automòbils, enfocant el punt de visió en la posada en marxa i el funcionament del sistema radar d'ona continua modulada en freqüència (FMCW) a 77 GHz, IWR1642Boost.

En els capítols 1 i 2 es fa una breu introducció teòrica dels sistemes radars, enfocant l'explicació cap a l'àmbit de l'automoció, i alhora, explicant la teoria del radar, és a dir, com és el funcionament d'aquest sistema per a extreure les mesures indicades.

En el capítol 3 s'expliquen les bases teòriques, la descripció i la comprensió del funcionament, de la placa IWR1642Boost (*hardware* i *software*), així com tota posada en marxa del sistema.

Finalment, en el capítol 4 s'exposa el funcionament real del radar a partir de la realització de diferents experiments. Els primers d'ells, realitzats per a conèixer si el sistema funcionava correctament per a seguir realitzant mesures. Els següents experiments, per a poder treballar amb les dades rebudes del radar utilitzant diferents escenaris d'observació, com ara la utilització del reflector tetraedre, per a mostrar els resultats convenients.

Gràcies a aquest projecte, es pot entrar una mica més profundament en la comprensió del radar d'automoció. Com a treball futur, fent servir les eines proporcionades per la companyia *Texas Instruments*, com el *Code Composer Studio*, es pot arribar a implementar un codi a partir del qual es puguin obtenir les dades abans de l'entrada en el mòdul DSP de la placa. Això permetrà una millor manipulació i, a la vegada, es podran realitzar mesures, com per exemple la recuperació de fase a partir de vibracions, que actualment no es poden realitzar.

Bibliografia

- [Ali17] Sujeet Milind Patole Murat Torlak Dan Wang Murtaza Ali, “Automotive radars: A review of signal processing techniques”, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017.
- [Aut18] Chirs Händel Heikki Konttaniemi Matti Autioniemi, “State-of-the-art review on automotive radars and passive radar reflectors”, *Lapland University of Applied Sciences Publications*, 2018.
- [Bha16] Niraj Prasad Bhatta, “Radar and its applications”, *International Conference on Novel Issues and Challenges in Science & Engineering*, 2016.
- [Bro09] Armin W. Doerry Billy C. Brock, “Radar cross section of triangular trihedral reflector with extended bottom plate”, Tech. rep., Sandia National Laboratories, 2009.
- [Dic13] H. Meinel Juergen Dickmann, “Automotive radar: From its origin to future directions”, *Microwave Journal*, 2013.
- [Gon18] Jia Ji Yang Yong Zhi Cheng Dong Qi Rong Zhou Gong, “Study of energy scattering relation and rcs reduction characteristic of matrix-type coding metasurface”, *MDPI applied sciences*, 2018.
- [Gre11] Maria S. Greco, “Automotive radar”, *IEEE Radar Conference*, 2011.
- [Gri18] Professor Hugh Griffiths, “A history of radar”, *IEEE Dist Lecture Radar History*, 2018.
- [Gua10] Massimo Guarnieri, “The early history of radar”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2010.
- [Hol04] Dr. Wolfgang Holpp, “The century of radar”, *EADS*, 2004.
- [Kia05] Hsueh-Jyh Li Yean-Woei Kiang, “Radar and inverse scattering”, *The Electrical Engineering Handbook*, 2005.
- [Men18] Eloi Guerrero Menéndez, “Frequency-modulated continuous-wave radar in automotive applications”, Tech. rep., UAB, 2018.
- [Pac18] Pedro de Paco, “Radar signals and systems”, *FMCW Radar Lecture*, 2018.
- [Pon14] Dr A. M. Ponsford, “Introduction to radar”, *IEEE Mission: A world of innovation*, 2014.
- [Pra18] P. V. Jayasri K. Niharika K. Yedukondalu E. V. S. Sita Kumari A. V. V. Prasad, “Radar cross section characterization of corner reflectors in different frequency bands and polarizations”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018.

- [RCS14] *Radar Cross Section (RCS)*, 2014.
- [Texa] Texas Instruments, *IWR1642 Single-Chip 76- to 81- GHz mmWave Sensor*.
- [Texb] Texas Instruments, *mmWave SDK User Guide*.
- [Texc] Texas Instruments, *User's Guide IWR1642 Evaluation Module Single-Chip mmWave Sensing Solution*.
- [Texd] Texas Instruments, *User's Guide mmWave Demo Visualizer*.
- [The11] *Introducción al radar*, 2011.
- [The17] *Introducción al radar*, 2017.